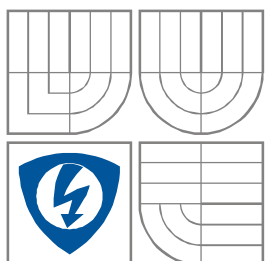




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

INTEGROVANÝ STEREOFONNÍ ZESILOVAČ PRO DOMÁCÍ AUDIO POSLECH

INTEGRATED STEREO AMPLIFIER FOR HOME AUDIO LISTENING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jakub Jaša

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, CSc.

BRNO, 2012

ZADÁNÍ

BB2E: V teoretické části práce navrhnete stereofonní výkonový zesilovač s výstupním výkonem do 100 W / 4 ohmech, včetně tepelné ochrany a ochrany reproduktorů. Zesilovač doplňte předzesilovačem se 4 audio vstupy, korekčním zesilovačem s ekvalizérem a fyziologickou regulací hlasitosti. Při konstrukci se zaměřte na dosažení nejnižšího zkreslení při maximálním výstupním výkonu.

BBCE: V praktické části práce vytvořte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu (schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupiska součástek atd.). Navržené zařízení realizujte formou funkčního prototypu a experimentálním měření v laboratoři nízkofrekvenční elektroniky ověřte jeho činnost. Výsledky měření zpracujte formou standardního protokolu.

ABSTRAKT

Tento dokument pojednává o návrhu stereofonního zesilovače, který se skládá z více funkčních audio bloků. Součástí dokumentu je řešení jednotlivých bloků, podrobného návrhu, schématu zapojení a dalších konstručních podkladů. Hlavním rozebíraným tématem je návrh, simulace schémat, konstrukce koncového zesilovače a zhodnocení použití tranzistorů ThermalTrak. Součástí je zhodnocení výsledků celé realizace a porovnání výsledků s jinými zesilovači.

KLÍČOVÁ SLOVA

Stereo zesilovač, ThermalTrak, ekvalizér, Atmel, fyziologická regulace hlasitosti, ochrana reproduktorů.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with design of a stereo amplifier, which consists of several functional blocks for the analog audio processing. This document describes the solution of individual functional audio blocks, detailed design including schematics and contains also other documents for the construction of the amplifier. The main topic is design, simulation, construction and evaluation of a power amplifier that uses power transistors ThermalTrak. The evaluation of the results of the whole implementation compares measured parameters with other types of amplifiers.

KEYWORDS

Stereo amplifier, ThermalTrak, equalizer, Atmel, loudness controll gain, speaker protection.

Jaša, J. *Integrovaný stereofonní zesilovač pro domácí audio poslech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 102 s., 45 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma integrovaný stereofonní zesilovač pro domácí audio poslech jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 20. května 2012

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu doc. Ing. Tomášovi Kratochvílovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou, odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu, za poskytnutí přístupu do laboratoře a za zapůjčení potřebných měřicích přístrojů. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Petrovi Procházkovi, Ph.D. za konstrukční rady a materiální pomoc při řešení projektu. Dále Děkuji panu Voráčovi a panu Vančurovi za rady a dobré nápady při praktické realizaci. Poděkování patří firmě ON Semiconductor za poskytnutí vzorků součástek pro realizaci funkčního prototypu.

V Brně dne 20. května 2012

.....
podpis autora

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ

ÚVOD	1
1 Teorie NF zesilovačů	2
1.1 Přehled řešení koncových stupňů zesilovače	2
1.2 Parametry zesilovačů	3
1.2.1 Vstupní impedance	3
1.2.2 Vstupní citlivost	3
1.2.3 Kmitočtová modulová charakteristika	3
1.2.4 Odstup signálu ku šumu	4
1.2.5 Přeslechy kanálů	4
1.2.6 Výstupní výkon	4
1.2.7 Výstupní impedance	4
1.2.8 Rychlost přeběhu	5
1.2.9 Dynamika	5
1.2.10 Zkreslení THD+N	5
2 Návrh blokového schématu vlastního řešení	6
2.1 Popis jednotlivých bloků	7
2.1.1 Vstupní obvody	7
2.1.2 Vstupní zesilovač a omezovač signálu	7
2.1.3 Ekvalizér	7
2.1.4 Fyziologická regulace hlasitosti	8
2.1.5 Výkonový zesilovač	8
2.1.6 Ochrana reproduktorů	8
2.1.7 Dotykový spínač	8
2.1.8 Řízení zesilovače	8
2.1.9 Obvody zdrojů	9
2.2 Návrh schématu zapojení	10
2.2.1 Modul předzesilovače	10
2.2.2 Modul omezovače amplitudy	12
2.2.3 Potenciometrický přepínač vstupů	14

2.2.4	Korekční zesilovač	15
2.2.5	Simulace ekvalizéru.....	17
2.2.6	Fyziologická regulace hlasitosti	22
2.2.7	Koncový stupeň zesilovače	24
2.2.8	Simulace zesilovače.....	26
2.2.9	Tranzistory ThermalTrak.....	30
2.2.10	Ochrana reproduktorů.....	31
2.3	Řízení zesilovače.....	33
2.3.1	Důvody řízení zesilovače.....	33
2.3.2	Popis schématu	34
2.3.3	Komunikace se zesilovačem.....	36
2.3.4	Program řízení zesilovače.....	36
2.4	Napájecí zdroje.....	39
2.4.1	Zdroj pro číslicovou část	39
2.4.2	Napájecí zdroj pro předzesilovače.....	40
2.4.3	Napájecí zdroj pro koncový stupeň zesilovače.....	42
3	Závěr.....	43
4	Seznam použité literatury	44
5	Přílohy	45
5.1	Příloha tabulek.....	45
5.2	Konstrukční podklady	46
5.3	Protokol o měření	70
5.4	Fotodokumentace	85

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1: Blokové schéma zesilovače	6
Obrázek 2.2: Schéma zapojení modulu předzesilovače	11
Obrázek 2.3: Schéma omezovače amplitudy	13
Obrázek 2.4: Schéma zapojení přepínače vstupů	14
Obrázek 2.5: Schéma zapojení ekvalizéru	16
Obrázek 2.6: Modulová přenosová charakteristika ekvalizéru	17
Obrázek 2.7: Modulová přenosová charakteristika ovlivněná průběhem vedlejšími pásmy ...	18
Obrázek 2.8: Modulová přenosová charakteristika při různé hodnotě odporu R_{18}	19
Obrázek 2.9: Modulová přenosová charakteristika ekvalizéru pro potlačení středních kmitočtů	20
Obrázek 2.10: Výpočet pracovního bodu tranzistorů	21
Obrázek 2.11: Výpočet odběru proudu ze zdroje	21
Obrázek 2.12: Schéma zapojení fyziologické regulace hlasitosti	23
Obrázek 2.13: Schéma koncového stupně zesilovače	25
Obrázek 2.14: Časová odezva koncového stupně zesilovače	26
Obrázek 2.15: Frekvenční modulová přenosová charakteristika koncového stupně zesilovače	27
Obrázek 2.16: Schéma pro simulaci a výsledky pro výpočet pracovního bodu	28
Obrázek 2.17: Schéma zapojení pro simulaci odběrů z napájecího zdroje	29
Obrázek 2.18: Schéma zapojení ochrany reproduktorů	32
Obrázek 2.19: Schéma zapojení řízení zesilovače	35
Obrázek 2.20: Schéma zapojení napájecího zdroje	41
Obrázek 2.21: Schéma zapojení zdroje pro koncový stupeň zesilovače	42
Obrázek 5.1: Rozložení součástek předzesilovače, strana TOP, 127 x 82 mm, M 1:1	46
Obrázek 5.2: DPS předzesilovače, strana BOTTOM, 127 x 82 mm, M 1:1	46
Obrázek 5.5: DPS předzesilovače	46
Obrázek 5.6: rozložení součástek omezovače amplitudy, strana TOP,	48
Obrázek 5.7: DPS omezovače amplitudy, strana BOTTOM ,	48
Obrázek 5.8: Osazovací plán ekvalizéru, strana TOP, 201 x 65 mm, M 1:1	50
Obrázek 5.9: DPS ekvalizéru, strana BOTTOM, 201x 65 mm, M 1:1	51

Obrázek 5.10: Osazovací plán fyziologické regulace hlasitosti a potenciometrického přepínače vstupů, strana TOP, 126 x 61 mm, M 1:1	53
Obrázek 5.11: DPS fyziologické regulace hlasitosti a potenciometrického přepínače vstupů, 53	
Obrázek 5.12: Rozmístění součástek koncového stupně zesilovače, strana TOP,	55
Obrázek 5.13: DPS koncového stupně zesilovače, strana BOTTOM,	56
Obrázek 5.14: Osazovací plán modulu ochrany reproduktorů, strana TOP,	58
Obrázek 5.15: DPS ochrany reproduktorů, strana BOTTOM, 121 x 78,5 mm, M 1:1	58
Obrázek 5.16: Rozmístění součástek modulu řízení zesilovače, strana TOP,	60
Obrázek 5.17: DPS modulu řízení zesilovače, strana BOTTOM, 200 x 65 mm, M 1:1	61
Obrázek 5.18: Rozložení součástek zdroje se stabilizátory, strana TOP,	63
Obrázek 5.19: DPS zdroje se stabilizátory, strana BOTTOM,	64
Obrázek 5.20: Osazovací plán zdroje 45V, strana TOP, 84 x 208 mm, M 1:1	66
Obrázek 5.21: DPS zdroje 45V, strana BOTTOM, 84 x 208 mm, M 1:1	67
Obrázek 5.22: Osazovací plán modulu vstupů, strana TOP,	68
Obrázek 5.23: DPS modulu vstupů, strana BOTTOM,	68
Obrázek 5.24: Osazovací plán modulu transformátorů, strana TOP,	69
Obrázek 5.25: DPS modulu transformátorů, strana BOTTOM,	69

ÚVOD

Zesilovač pro audio signál je konstruován za účelem zesílení signálu. Při přehrávání zvuků a hudby z přehrávačů nebo osobních počítačů není většinou možné připojit reproduktory ke zdroji signálu přímo, protože zdroj by byl nadměrně zatížen. Pokud je nutné ozvučit místnost nebo areál, je zapotřebí určitého výkonu. Potom je nutnost použít zesilovač. Výkon zesilovače je relativní a vždy je třeba jej posuzovat z hlediska použití nebo očekávaných výsledků ozvučení. Kvalita zesilovače je posuzována nejen podle výstupního výkonu, ale i podle ostatních parametrů. Udávané parametry zesilovačů jsou podrobně popsány např. v lit. [1] a [2]. Zesilovač pro domácí audio poslech bude postaven za účelem každodenního používání při zesilování výkonu hudby. Parametry zesilovače musí být dostatečné vůči ozvučované místnosti. V dnešní době existují dva přístupy ke konstrukci a principu zesilovače. Jeden přístup je založen na digitálním zpracování zvuku, úpravě a výkonovém zesílení. Veškeré operace se signálem se dějí čistě číslicovou metodou. Řešení tímto postupem je omezeno kvalitou použitých součástek, především rychlostí spínání polovodičových prvků. Velikou výhodou je mobilita zařízení, odolnost vůči rušení, účinnost a výsledná malá velikost produktu. Úprava signálu je řízena mikroprocesorem, který může sloužit jako ekvalizér, kompander, regulátor hlasitosti, dálkový přijímač atd. Druhý přístup je založen na analogovém postupu zesilování a úpravy signálu. Funkční bloky obvodu jsou postaveny z diskrétních součástek. Výsledné zařízení je mohutnější, má menší účinnost, je zde větší náchylnost k rušení. Daná konstrukce má i své výhody. Při zdařilé konstrukci jsou parametry zesilovače vynikající.

1 Teorie NF zesilovačů

NF zesilovač je zesilovač s omezenou frekvenční charakteristikou. Dolní hranice frekvenční charakteristiky by měla začínat od $f_{\text{mezd}} = 20 \text{ Hz}$, dle literatury [1] od $f_{\text{mezd}} = 16 \text{ Hz}$. Horní hranice frekvenční charakteristiky by měla končit za nejvyšší použitou frekvencí v přehrávané audio skladbě. V literatuře [1] je uvedeno, že horní hranice frekvenční charakteristiky může končit na $f_{\text{mezh}} = 16 \text{ kHz}$, tato hranice však může být daleko výše podle nároků na kvalitu přehrávané audio skladby, tak aby zesilovač přenesl bez zkreslení a s patřičným zesílením i ty nejvyšší kmitočty hudebních nástrojů. V praxi se tedy často objevují zesilovače s horní mezní frekvencí $f_{\text{mezh}} = 100 \text{ kHz}$, kde je dostatečná rezerva pro přenos nejvyšších kmitočtů. Zesilovače se můžou dělit na napěťové a výkonové. Napěťové zesilovače slouží k zesílení napětí, ale nedodávají do zátěže velký výstupní proud, většinou jsou jako předstupeň před koncovým stupněm zesilovače. Výkonové zesilovače jsou určeny pro buzení zátěže, kde zátěží je připojený reproduktor. Impedance zátěže je v řádech jednotkách Ohmu, proto výkonové zesilovače musí být dimenzovány na výstupní proudy v řádech Ampérů.

1.1 Přehled řešení koncových stupňů zesilovače

Koncový stupeň zesilovače musí dodat do zátěže proud, který má nulovou střední hodnotu. Z tohoto důvodu můžeme rozdělit koncový stupeň na komplementární zapojení nebo kvazikomplementární zapojení. Při zapojení komplementárního zapojení jsou v koncovém stupni použity tranzistory pro kladnou větev jedné vodivosti, pro zápornou tranzistory opačné vodivosti. Typ tranzistorů je stejný. Buzení tranzistorů je ve stejné fázi. Při použití tranzistorů stejné vodivosti i typu je koncový stupeň nazván kvazikomplementární. Buzení daného stupně je v opačné fázi. Při realizaci koncového stupně s několika paralelně zapojenými tranzistory v jedné větvi je nutností použití stejných typů tranzistorů, nejlépe ze stejné výrobní série, jedině tak se eliminuje vliv tepelného zničení koncového stupně, mimo přetížení zesilovače. Koncový stupeň může být osazen bipolárními nebo unipolárními typy tranzistorů. Bipolární tranzistory při paralelním zapojení je zapotřebí opatřit emitorovým odporem v řádech Ohmu. Důvod zapojení je eliminace kladného tepelného součinitele polovodičového přechodu. Při rostoucí teplotě klesá odpor přechodu tranzistoru a tranzistor přebírá většinu proudu tekoucího do zátěže. Vzniká kladná zpětná vazba a následuje destrukce, zapojením emitorového odporu zaniká zpětná kladná vazba a tranzistor je uchráněn před destrukcí. Unipolární tranzistory je možné zapojovat přímo paralelně, protože zde je situace opačná, při rostoucí teplotě roste odpor vodivostního kanálu.

1.2 Parametry zesilovačů

Při posuzování kvalit zesilovačů byly stanoveny parametry, které se získávají měřením zesilovačů za určitých podmínek. Informace o parametrech a jejich měření jsou převzaty z literatury [1]. Mezi nejzákladnější parametry zesilovačů patří :

- Vstupní impedance
- Vstupní citlivost
- Kmitočtová modulová charakteristika
- Odstup signálu ku šumu
- Přeslechy kanálů
- Výstupní výkon
- Výstupní impedance
- Činitel tlumení
- Rychlost přeběhu
- Dynamika
- Zkreslení THD+N

1.2.1 Vstupní impedance

Vstupní impedance je důležitá pro správné přizpůsobení zdroje signálu a následujícího zesilovače. Aby nedocházelo k přetížení zdroje signálu a následně tak k degradaci kvality signálu, měl by být vstupní odpor 5 až 10 krát větší, než odpor zdroje, tato skutečnost je uvedena v lit. [1].

1.2.2 Vstupní citlivost

Vstupní citlivost udává velikost vstupního napětí, které je potřebné k dosažení předem stanovené hodnoty výstupního napětí. Čím více se vstupní napětí blíží hodnotě vstupní citlivosti, tím více klesá hodnota signálu ku šumu. Dále se uvádí hodnota vstupního napětí, kterou zesilovač zpracuje bez znatelného zkreslení a limitace.

1.2.3 Kmitočtová modulová charakteristika

Kmitočtová modulová charakteristika udává, jaké kmitočty a s jakým zesílením je zesilovač schopen přenést. Pro pokles charakteristiky o 3 dB jsou určeny mezní kmitočty. Mezní kmitočet zesilovače by měl respektovat požadavky na věrnost audio reprodukce.

1.2.4 Odstup signálu ku šumu

Daný parametr je udáván v dB. Dává do poměru užitečný signál a rušivý signál. Rušivý signál může být šum, protože zesilovač je aktivní prvek, zesiluje šum na vstupu a také může negativně přidávat i další rušivé složky například další harmonické vzniklé intermodulací signálu. Čím je větší odstup signálu ku šumu, tím je možné používat zesilovač i pro menší výkony bez subjektivního vnímání rušivých složek. Pro výkonový zesilovač je požadavek odstupů více než $L_{\text{odst}} = 60$ dB, uvedeno v lit. [1].

1.2.5 Přeslechy kanálů

Přeslech je negativní vlastnost u vícekanálových zesilovačů, kde jeden kanál ovlivňuje druhý kanál. Přeslechy mohou vznikat kapacitní vazbou mezi vodiči, nedokonalou izolací například ve stereofonních potenciometrech nebo na vstupním konektoru, který je realizován elektricky. Hodnota přeslechů obecně roste se zvyšující se frekvencí kvůli kapacitním vazbám. Přeslechy mohou vznikat při použití jednoho zdroje pro více kanálů nebo při nevhodném zemnění. Maximální hodnota přeslechů je uvedena v lit. [1] pro HiFi může být přeslech maximálně $L_{\text{přes}} = -50$ dB na kmitočtu $f = 1000$ Hz.

1.2.6 Výstupní výkon

Výstupní výkon je parametr zesilovače, který udává jaký sinusový výkon je zesilovač schopen předat do jmenovité zátěže po určitý čas a při předem definovaném zkreslení výstupního signálu. Potom se tedy jedná o výkon sinusový. Výkon sinusový se měří při buzení sinusovým signálem o frekvenci $f = 1000$ Hz. Další výkon je označován hudební, který nepopisuje trvalý výkon na zátěži.

1.2.7 Výstupní impedance

Hodnota výstupní impedance by měla být co nejmenší, maximální hodnota impedance by neměla přesáhnout třetinovou hodnotu připojené impedance zátěže. Čím je hodnota výstupní impedance menší, tím je větší činitel tlumení a dochází k lepšímu utlumení připojené zátěže. Výstupní impedance je dána vztahem 1.1.

$$R_{\text{zes}} = \frac{U_0 - U_z}{I_z} [\Omega] \quad (1.1)$$

Kde:

U_0 = napětí na výstupu zesilovače bez připojené zátěže

U_z = napětí na výstupu zesilovače s připojenou zátěží

I_z = proud zátěží.

1.2.8 Rychlost přeběhu

Parametr udávající s jakou rychlostí je zesilovač schopen měnit výstupní napětí. Měření parametru probíhá při buzení zesilovače obdélníkovým průběhem s velikostí odpovídající maximálnímu výkonu. Měří se velikost náběžné a sestupné hrany v rozmezí $U_{pp} = (10 \div 90) \%$ a zároveň se měří časový úsek mezi těmito hodnotami. Čím je rychlost přeběhu větší, tím je zesilovač schopen lépe přenést i vyšší kmitočty bez zkreslení.

1.2.9 Dynamika

Podle lit. [1] je dynamika poměr mezi maximální a minimální hodnotou signálu. U zesilovače je spodní hranice dynamiky omezená šumem, brumem, nebo rušivým signálem. Maximální hranice je omezená maximálním výstupním napětím, které je omezeno napájecím napětím.

1.2.10 Zkreslení THD+N

Míru zkreslení popisuje činitel zkreslení. Zkreslení může být lineární, způsobené nevěrným zesílením amplitudy signálu, nebo zkreslení nelineární, kdy ve spektru vznikají nové složky, které nebyly v původním signálu obsaženy. Činitel zkreslení se udává v procentech. Obecně vznikají nežádoucí složky na nelineárních součástkách, přechodech tranzistorů a na jejich nelineárních charakteristikách. Proto je rovněž důležité aby zesilovač pokud možno pracoval v co nejlineárnější části charakteristik tranzistorů. Bohužel tento fakt jde proti účinnosti. Snížení zkreslení je možné přispět vhodným nastavením pracovního bodu zesilovače. Činitel zkreslení je vždy větší než 1, protože každý člen řetězce přidává vlastní zkreslení.

2.1 Popis jednotlivých bloků

Další podkapitoly popisují základní funkce bloků. Je zde uvedeno, jak spolu souvisí jednotlivé bloky a jaký je jejich účel. Není zde uveden podrobný popis, návrh ani schéma.

2.1.1 Vstupní obvody

Mezi vstupní obvody zesilovače patří veškeré zařízení sloužící pro příjem signálu analogového, nebo digitálního. Obvody vstupů také slouží k základní úpravě signálu vstupního, především omezení limitních hodnot a ochrana před poškozením citlivých obvodů zesilovače. Konektivita mezi periferiemi je zajištěna pomocí mechanických kontaktů konektorů. Všechny konektory budou umístěny na zadním panelu zesilovače. Vstup pro analogový signál je řešen pomocí konektorů CINCH, JACK a DIN 5. Celkem jsou k dispozici čtyři audio vstupy, které jsou na sobě nezávislé. Jsou přepínatelné tak, že maximálně jeden vstup je používán nebo žádný. Není možné tedy mezi kanály audiosignálu mixovat a slučovat je. Vstupní odpor je zvolen dle lit. [1] jako univerzální vstupní odpor a činí $R_{\text{vst}} = 47 \text{ k}\Omega$. Je zde kladen důraz na kvalitu konektorů z důvodu dlouhé životnosti, ale i na kvalitu přebuditelnosti zesilovače a odolnosti vůči rušivým složkám a nežádoucím úrovním signálu. Předpokládá se připojení zesilovače k osobnímu počítači, televizi, DVD přehrávači, ale i starších zařízení. Úroveň vstupního signálu se tedy bude pohybovat do maximálně $U_{\text{vstmax}} = 2 \text{ V}$. Nad tuto úroveň je třeba signál omezit přijatelným způsobem. Především omezením jeho amplitudy. To způsobem, při kterém vznikne pokud možno co nejméně rušivých složek ve výstupním spektru. Vstup digitální je zde z důvodu snadného programování zesilovače i s osazeným mikroprocesorem a tedy i snadné ladění řídicího programu. Pomocí konektoru RJ-45 se připojí programátor pro mikrokontrolér ATMEL řady AVR. Nepředpokládá se vliv rušivých signálů ani limitních hodnot napětí, proto tento vstup nebude složitě ošetřen.

2.1.2 Vstupní zesilovač a omezovač signálu

Vstupní zesilovač následuje za obvody vstupu analogového NF signálu. Zesiluje vstupní signál na hodnotu vhodnou k dalšímu zpracování. Dále impedančně odděluje zdroj signálu od dalších modulů zesilovače. Zesílení by mělo být největší a zároveň šum by měl být nejmenší. Omezovač signálu slouží jako ochrana před limitními hodnotami vstupního signálu a zabraňuje zároveň zničení operačního zesilovače.

2.1.3 Ekvalizér

Ekvalizér je obvod, který pomocí nastavení polohy tahových potenciometrů ovlivňuje průběh frekvenční charakteristiky zesilovače. Z ideální charakteristiky, kde je přenos konstantní, je tak možné v určitém frekvenčním pásmu změnit zesílení. Dané nastavení je subjektivní a záleží na posluchači. Není tedy možné určit, který průběh je ideální, ale zároveň by neměl ekvalizér v nulových polohách potenciometrů ovlivňovat frekvenční charakteristiku.

2.1.4 Fyziologická regulace hlasitosti

Regulace hlasitosti je jedním ze základních stavebních bloků zesilovače a slouží k nastavení požadované hladiny hlasitosti. Nastavení je subjektivní. Hlasitost je ve většině případech ovládána potenciometrem s logaritmickou stupnicí. Podle nedokonalosti vjemu lidského sluchu vznikly tzv. Fletcher-Munsonovi křivky [1]. Podle těchto křivek nevnímá lidský sluch stejnou hladinu hlasitosti na různých kmitočtech. Fyziologická regulace hlasitosti by měla mít opačných průběh a tím kompenzovat nedokonalost lidského sluchu. Obvod regulace vyvážení ovlivňuje zesílení obou kanálů přesně opačně. Tímto se může docílit stejné hlasitosti v místě poslechu i když nejsou reproduktory ve stejné vzdálenosti od posluchače.

2.1.5 Výkonový zesilovač

Audio signál upravený předchozími bloky je napěťově zesílen, ale nemá dostatečný výkon pro připojené reproduktory. Výkon pro reproduktory má zajistit výkonový zesilovač, který by měl pouze zesilovat signál v určitém pásmu a výstupní signál by neměl být ovlivněn připojenou zátěží. Jsou zde ale meze použitelnosti daného stupně a to především mez proudovým zatěžováním.

2.1.6 Ochrana reproduktorů

Obvod ochrany slouží k ochraně reproduktorů před stejnosměrným napájecím napětím zesilovače. V případě, že by se v koncovém stupni zničily tranzistory, tak by se na výstupu zesilovače objevilo napájecí napětí, které by mohlo vážně poškodit připojené reproduktory. Obvod tedy reaguje na stejnosměrnou složku a v případě poruchy jsou reproduktory odpojeny. Při zapnutí zesilovače by neměly být reproduktory připojené okamžitě, ale s určitým časovým zpožděním. V důsledku přechodových jevů v zesilovači mohou vznikat napěťově špičky, které mohou být svou velikostí škodlivé a zároveň není příjemný pocit poslouchat při každém zapnutí zesilovače lupnutí v reproduktorech.

2.1.7 Dotykový spínač

Dotykový spínač snímá přes dotykovou plochu vnější podněty. Nahrazuje tak svojí funkcí mechanické přepínací prvky, které by se používáním mohly opotřebovat nebo nepřesně plnit svoji funkci. Při změně napětí na dotykové ploše se zesilovač uvede ze stavu pohotovostního do stavu zapnutého. Obvod musí být chráněn před statickou elektřinou. Výstup obvodu je přímo spojen s obvodou řízení zesilovače.

2.1.8 Řízení zesilovače

Obvod řízení zesilovače plní funkci ovládacího centra pro celý zesilovač. Jedná se o mozek celého zařízení, který zpracovává vnější i vnitřní podmínky. Zároveň je zde

možná komunikace s okolím. Řízení bude probíhat programem, který bude optimalizován pro daný zesilovač. Spolehlivost bloku bude vysoká, protože realizace bude čistě číslicová pomocí mikrokontroléru.

2.1.9 Obvody zdrojů

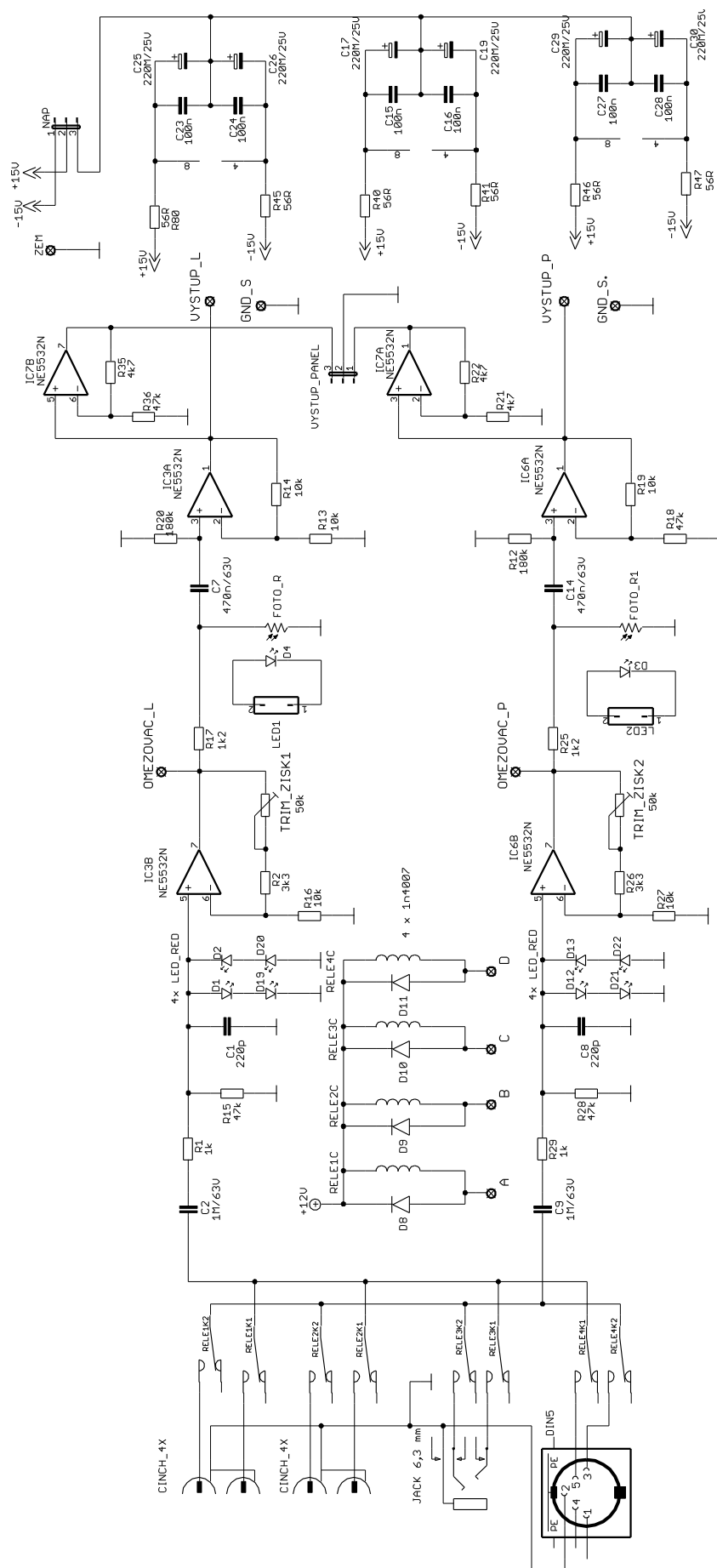
Úkolem obvodu zdrojů je přeměnit střídavé síťové napětí na napětí stejnosměrné určité velikosti. Napájecí zdroj se podílí na kvalitě celého zařízení. Hlavním požadavkem je stálost napětí i při zatěžování zdroje a malá velikost rušivých složek superponovaných na napětí. V praxi je třeba volit vhodný kompromis mezi kvalitou a cenou. Velikost zdroje by měla být pokud možno co nejmenší, ale při vyšších výkonech roste i velikost zdrojového modulu. V zesilovači bude zdrojů více, protože je třeba více napětíových hladin a také výkon jednotlivých zdrojů se bude lišit. Použitím více zdrojů se eliminuje vliv rušení jednoho zdroje do druhého. Tím by se mělo zamezit rušení mezi digitální a analogovou částí. Pokud se zdroj málo naddimenzuje, kvalita zařízení klesá a dosažené parametry nejsou optimální z hlediska použitých modulů. Zesilovač bude sestaven z několika modulů a pokud by jeden modul byl poddimenzován, nebo navržen nevhodně, negativně tím ovlivní i další moduly, byť je jejich kvalita a parametry vynikající. Proto je třeba věnovat obvodům zdroje zvýšenou pozornost, protože bez kvalitního zdroje nemůže vzniknout kvalitní zesilovač.

2.2 Návrh schématu zapojení

V této kapitole bude uveden podrobnější popis jednotlivých modulů. Bude zde uvedeno schéma zapojení s názorným vysvětlením funkce modulu.

2.2.1 Modul předzesilovače

Předzesilovač byl navržen na základě poznatků v lit. [1]. Na vstupu jsou 4 konektory umístěné na zadním panelu, jedná se o konektory CINCH, JACK 6,3 a DIN5. Signál z konektorů je vybrán pomocí dvojitých relé. Kondenzátor C_2 slouží jako ochrana před stejnosměrným napětím a zároveň zabraňuje stejnosměrné vazbě předzesilovače se zdrojem signálu. LED diody na vstupu operačního zesilovače IC3B slouží jako ochrana před napětím, které by mohlo zničit následující citlivé obvody. Maximální vstupní napětí na neinvertujícím vstupu IC3B bude $U_{\max} = 4,4$ V. Operační zesilovač byl vybrán typ NE5532, jedná se o nízko šumový bipolární operační zesilovač. Byl vybrán z důvodu argumentu v lit. [6]. Podle literatury jsou bipolární obvody méně šumové, než protějšky unipolární. Trimr TRIM_ZISK určuje spolu s odpory R_2 a R_{16} zesílení v rozmezí $A_{\text{předz}} = 1,33 \div 6,33$. Z výstupního pinu OMEZOVAC je veden signál k modulu omezovače amplitudy. Rezistor FOTO_R je optorezistor a spolu s rezistorem R_{17} tvoří proměnný dělič napětí. Dělicí poměr je ovládán modulem omezení amplitudy a závisí na hodnotě signálu v bodě za operačním zesilovačem IC3B. Tento dělič nastavuje velikost napětí na výstupu předzesilovače na maximální hodnotu, při které by nemělo dojít k limitaci koncového stupně zesilovače. Progresivita omezení signálu by měla respektovat dynamiku audiosignálu. Další stupeň tvořený IC3A slouží k zesílení signálu a buzení dalšího stupně zesilovače, tedy modulu ekvalizéru. Konektor VYSTUP_PANEL slouží k vyvedení signálu předzesilovače na zadní panel zesilovače. Modul předzesilovače je napájen symetrickým napětím o hodnotě $U_{\text{noz}} = \pm 15$ V ze zdroje pro analogovou část. Schéma ukazuje Obrázek 2.2. Rozpisku součástek ukazuje Obrázek 5.1, podklady pro výrobu DPS Obrázek 5.2 a seznam použitých součástek Tabulka 5.5.

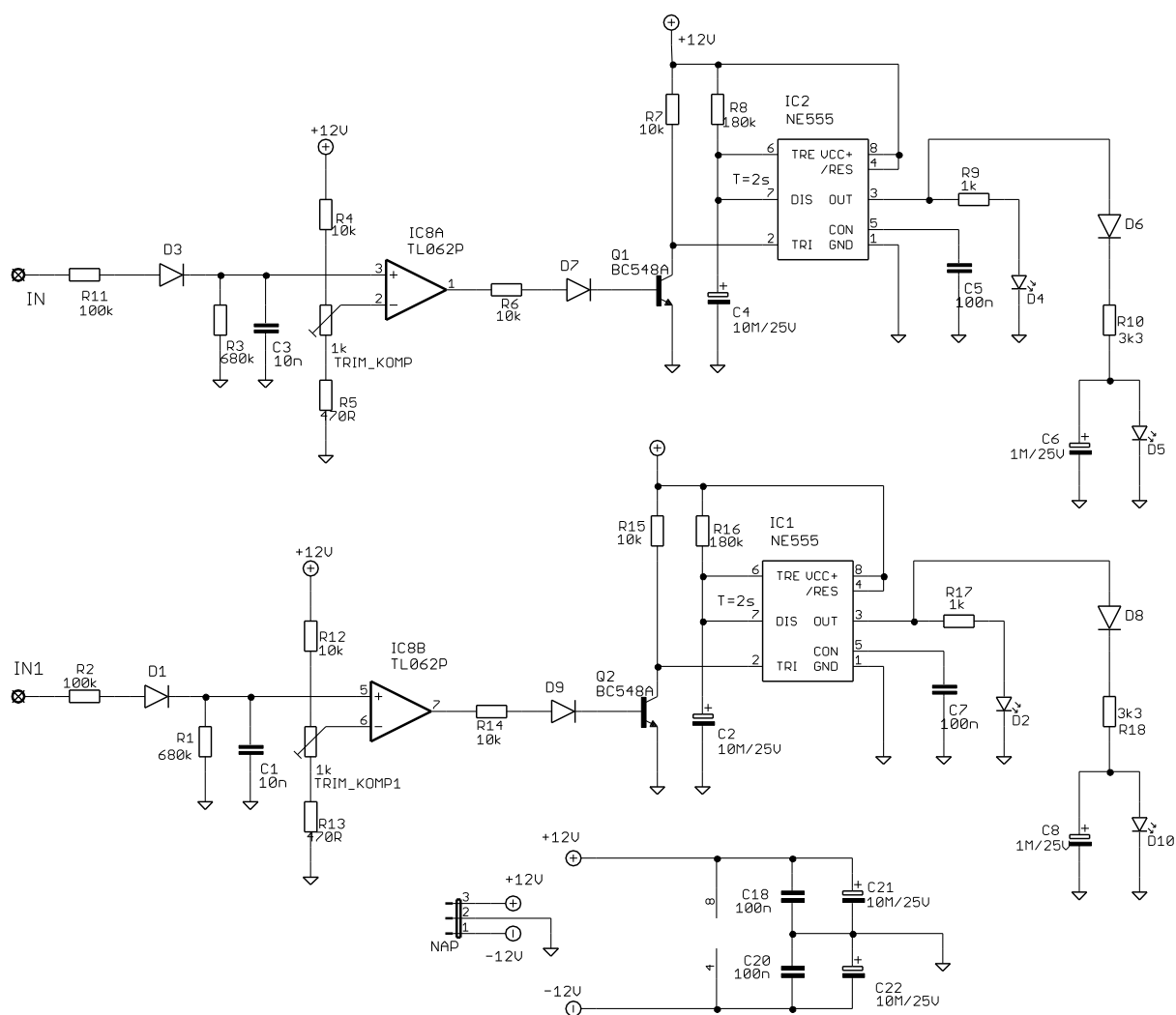


Obrázek 2.2: Schéma zapojení modulu předzesilovače

2.2.2 Modul omezovače amplitudy

V zesilovači bude obvod předzesilovače vstupních signálů vylepšen o automatické omezování maximální dovolené úrovně amplitudy signálu. Vycházelo se z poznatků v lit. [1]. Schéma je upraveno a jsou přepočítány hodnoty prvků dle požadavků. Očekává se, že tímto zlepšením předzesilovače se prodlouží životnost zařízení, ale taky by nemělo dojít k limitaci zesilovače. Obvod s IC8A je zapojen jako komparátor, který porovnává vstupní úroveň signálu s nastavenou hodnotou. Rozhodovací úroveň je nastavitelná v rozmezí $U_{roz} = (0,51 \div 1,5) \text{ V}$. Před komparátorem je Dioda D_3 a při nastavování omezovací úrovně se musí brát v úvahu úbytek napětí na této diodě. Jakmile dojde k překlopení komparátoru, překlopí se následující monostabilní klopný obvod¹ realizovaný NE555, tento MKO má časovací konstantu $\tau_{cas} = 2 \text{ s}$. Na výstupu NE555 je zapojena LED dioda D_4 , která bude signalizovat překlopení komparátoru na předním panelu. LED dioda D_5 sníží svým svitem odpor R_{foto} z odporu $R_{max} = 1 \text{ M}\Omega$ na odpor $R_{min} = 600 \Omega$. Kondenzátor C6 zmenšuje strmost hrany na výstupu klopného obvodu. Tímto se zajistí, aby ve spektru při skokové změně omezení signálu nevznikaly jiné parazitní složky. Zmenšení odporu R_{foto} sníží zesílení bloku zesilovače zhruba na $1/3$. Při návrhu předzesilovače se vycházelo z poznatků z literatury [2]. Komparátor je napájen symetricky ze zdroje $U_{nKomp} = \pm 12 \text{ V}$, MKO je napájen $U_{nKomp} = 12 \text{ V}$. Další možnost omezení nežádoucí úrovně na vstupu by mohlo být přidání dalšího komparátoru, který by reagoval na vyšší úroveň signálu a jeho výstup by byl připojen na vstup obvodu s mikrokontrolérem Atmel. Při vyhodnocení nežádoucí úrovně by se vstupy automaticky odpojily. Schéma zapojení ukazuje Obrázek 2.3. Obrázek 5.6 ukazuje rozložení součástek a Obrázek 5.7 ukazuje DPS. Rozpisku součástek ukazuje Tabulka 5.6: Seznam součástek omezovače amplitudy.

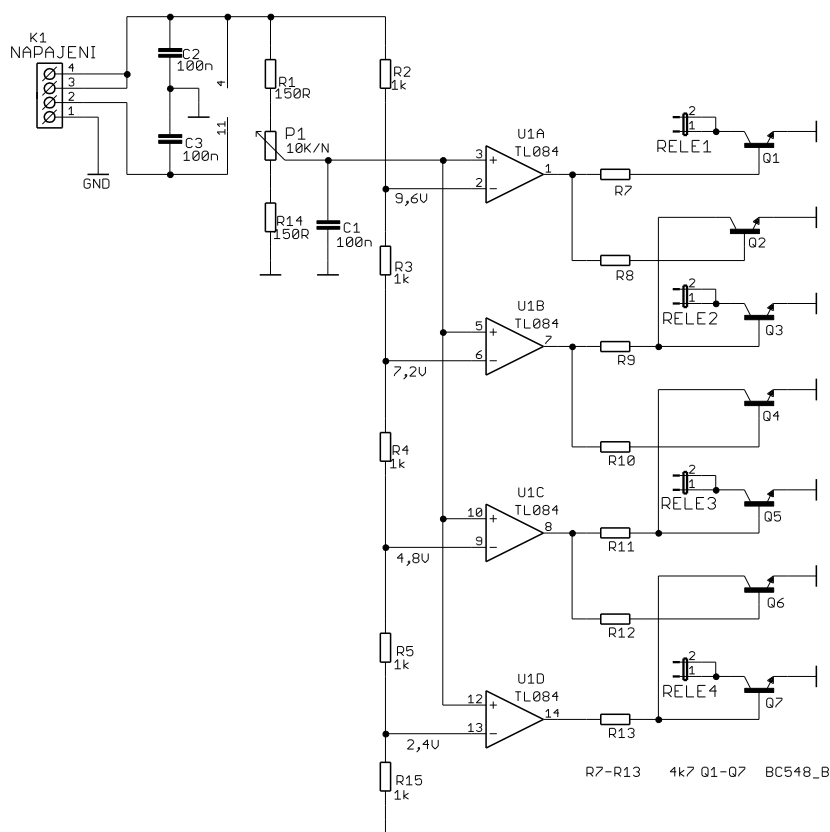
¹ Monostabilní klopný obvod reaguje na vnější podmět výstupním pulzem stejné šířky a amplitudy. Po zadaném čase je obvod schopen opět reagovat.



Obrázek 2.3: Schéma omezovače amplitudy

2.2.3 Potenciometrický přepínač vstupů

Jednotlivé vstupy budou přepínány pomocí dvojitých relé. Ovládání relé je řízeno modulem potenciometrického přepínače. Tento přepínač sepne buďto jedno relé nebo žádné. Přepínání relé nebude realizováno konstrukčně čtyř násobným přepínačem, ale modulem s potenciometrem. Modul přepínače je řešen jako snímač napětí na jezdcí potenciometru a tento stav je komparátory vyhodnocován. Každý komparátor má jinou rozhodovací úroveň překlopení, tyto úrovně jsou rozděleny ekvidistantně². Výstupy komparátorů spínají dvojici tranzistorů, jeden tranzistor spíná relé a zároveň LED diodu, která signalizuje stav přepínače. Druhý z tranzistorů blokuje předchozí stupně s tranzistory a tím je vypne. Natočení osy potenciometru v rozsahu do 1/5 způsobí vypnutí všech tranzistorů, to je vhodné při odpojení všech vstupů zesilovače např. při manipulaci se zdroji signálu bez nutnosti vypnutí zesilovače. Modul bude napájen $U_n = \pm 12$ V. Schéma zapojení je na Obrázek 2.4. DPS je společná s modulem fyziologické regulace hlasitosti, rozložení součástek ukazuje Obrázek 5.10, DPS Obrázek 5.11. Seznam použitých součástek ukazuje tabulka 5.8.



Obrázek 2.4: Schéma zapojení přepínače vstupů

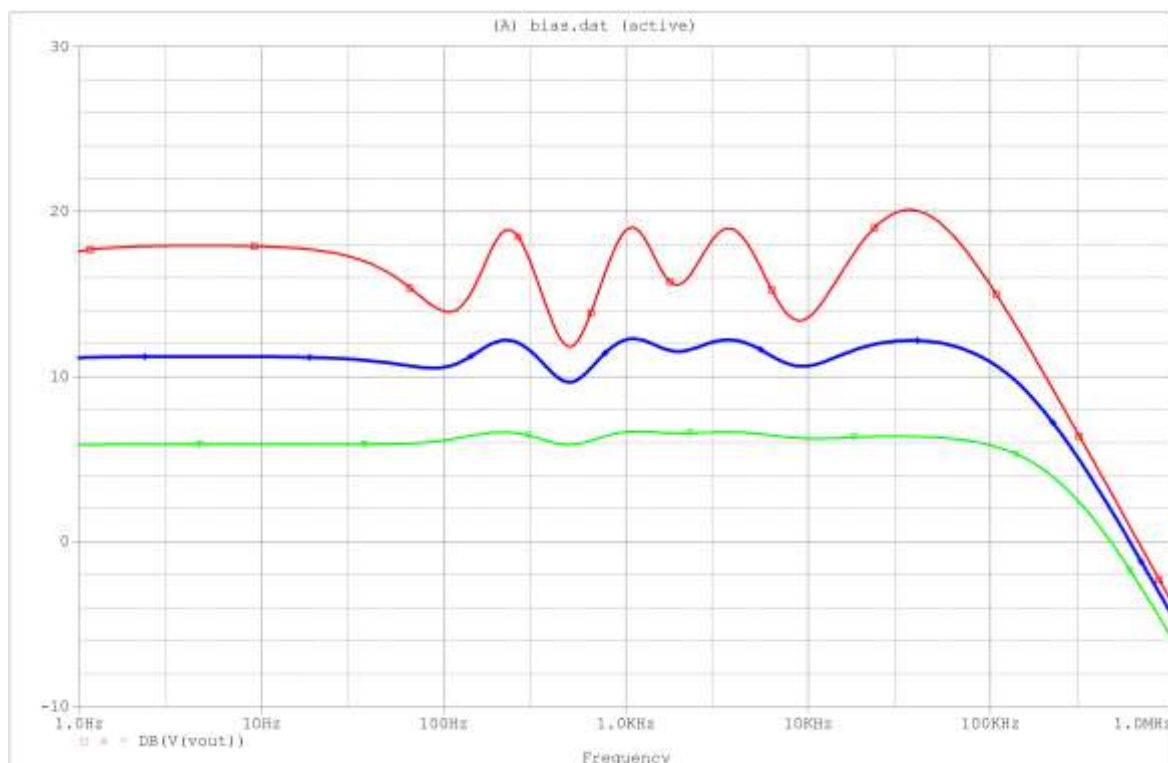
² Ekvidistantní dělení znamená dělit určitý celek na dílky, které jsou od sebe stejně daleko.

2.2.4 Korekční zesilovač

Korekční zesilovač by měl upravovat frekvenční charakteristiku dle subjektivního vjemu hudby. Byl vybrán pěti-pásmový ekvalizér, který je realizován otočnými stereofonními potenciometry. Dosaženým parametrem by měly být pevně dány mezní frekvence potlačení nebo zesílení daného kmitočtu. Dále by úprava charakteristiky měla být s konstantním potlačením nebo zesílením. Bez ovlivňování vedlejšími pásmy ekvalizéru. Maximální zisk na pásmo by měl být $A_{\max} = 15$ dB a potlačení rovněž $A_{\min} = 15$ dB. Schéma zapojení bylo upraveno z lit. [5]. Dělicí kmitočty jsou $f_1 = 50$ Hz, $f_2 = 250$ Hz, $f_3 = 1$ kHz, $f_4 = 4$ kHz, $f_5 = 16$ kHz. Důvod použití tranzistorů podle autora lit. [5] je snížení šumu daného zapojení oproti zapojení s operačními zesilovači místo syntetických indukčností. Kritickým prvkem ekvalizéru je odpor R_5 a R_{19} . Podle provedených simulací se dané odpory podílejí na velikosti zisku nebo potlačení daných pásem a taky na ovlivňování lineární regulace potenciometrů. Hodnota těchto odporů je kompromisem parametrů ekvalizéru. Dalším kritickým prvkem je kondenzátor C_1 a C_2 . Jedná se o vytvořený bipolární kondenzátor z elektrolytických kondenzátorů. Tyto kondenzátory mohou s časem měnit své parametry a nevhodně ovlivňovat parametry ekvalizéru. Z toho důvodu by bylo vhodné nahradit C_1 a C_2 bipolárním kondenzátorem některého renovovaného výrobce, kde parametry budou vynikající a stálost celého obvodu bude vyhovující. Kondenzátor C_{36} je foliový kondenzátor a snižuje sériový odpor C_1 a C_2 . Obvod bude napájen ze symetrického zdroje s hodnotou $U_{\text{nap}} = \pm 15$ V. Protože zesilovač bude stereofonní, byly použity stereofonní potenciometry. Schéma ukazuje Obrázek 2.5: Schéma zapojení ekvalizéru. DPS ukazuje Obrázek 5.9, osazovací plán Obrázek 5.8, v tabulce Tabulka 5.7 je seznam použitých součástek.

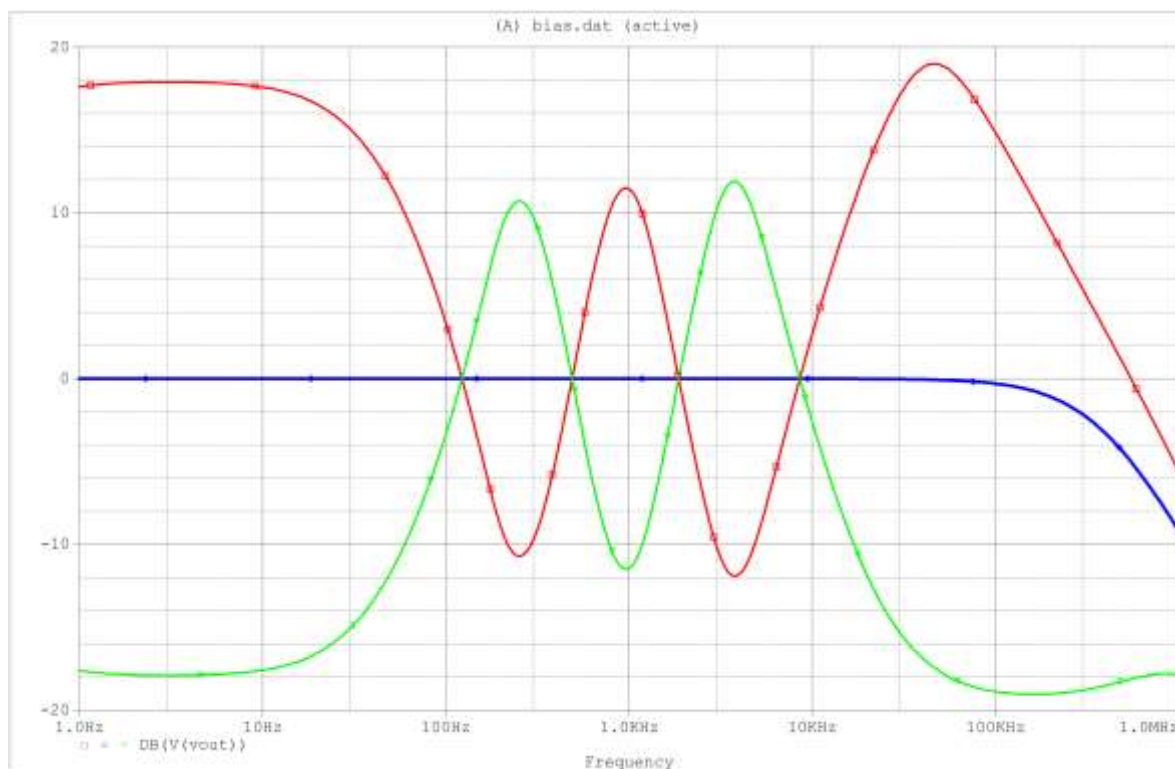
2.2.5 Simulace ekvalizéru

Při simulacích ekvalizéru je zřejmé, že maximální poloha vytočení ekvalizéru způsobuje nelinearitu ve frekvenční oblasti. Nelinearita se dá snížit nastavením potenciometru na 90% z rozsahu, tím se docílí menší nelinearity ve frekvenční oblasti ekvalizéru, ale zároveň se sníží zesílení v daném pásmu. Výsledek simulace ukazuje Obrázek 2.6.



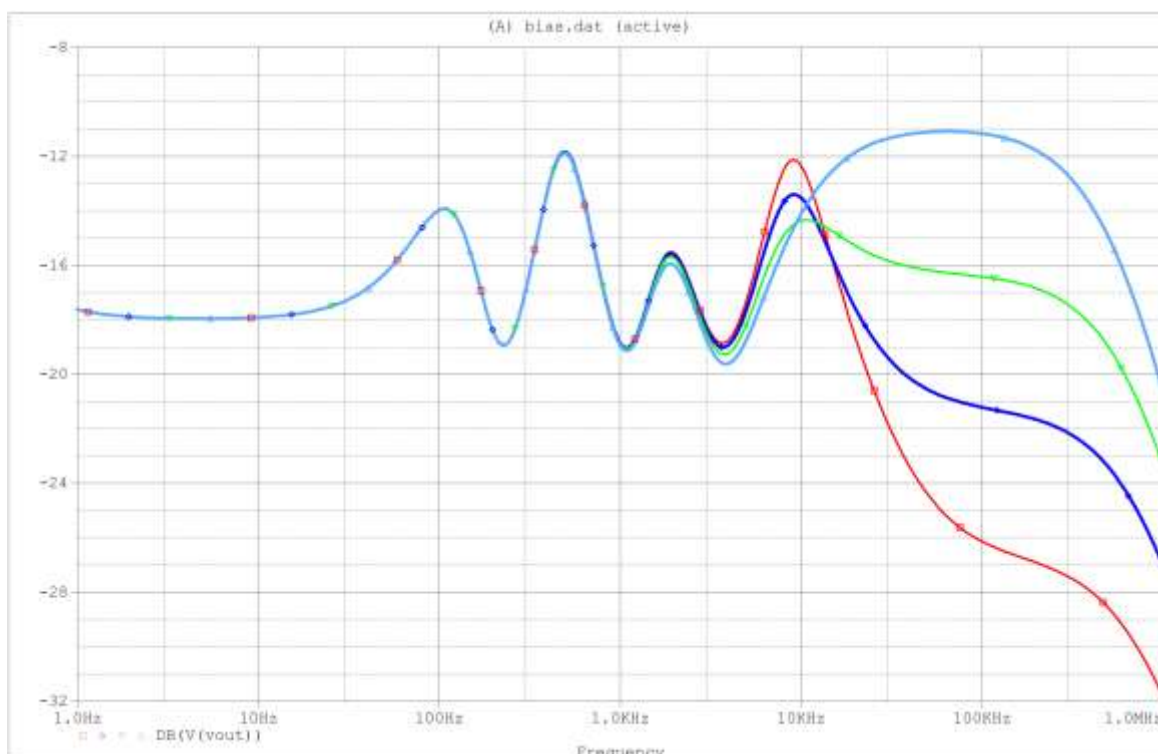
Obrázek 2.6: Modulová přenosová charakteristika ekvalizéru

Obrázek 2.7: Modulová přenosová charakteristika ovlivněná průběhem vedlejšími pásmy ukazuje vliv nastavení potenciometrů přesně opačně, než je předchozí potenciometr. Ze simulace je vidět, že okolní pásmo ovlivňuje nepříznivě následující pásmo a to tím více, čím je více pásmo zesíleno nebo potlačeno. Tedy pásma se ovlivňují navzájem a to výrazně. Pásmo $f_1 = 50$ Hz a $f_5 = 16$ kHz je zesíleno více než pásmo $f_3 = 1$ kHz, protože pásmo $f_3 = 1$ kHz je ovlivněno z obou stran potlačením vedlejších filtrů. Na vyšších kmitočtech $f = 100$ kHz a více, je patrný pokles zesílení. Je pravděpodobné, že tato skutečnost je způsobena nedokonalostí operačního zesilovače. Pro nastavení potenciometrů do středové polohy je charakteristika podle simulace lineární až do mezní frekvence.



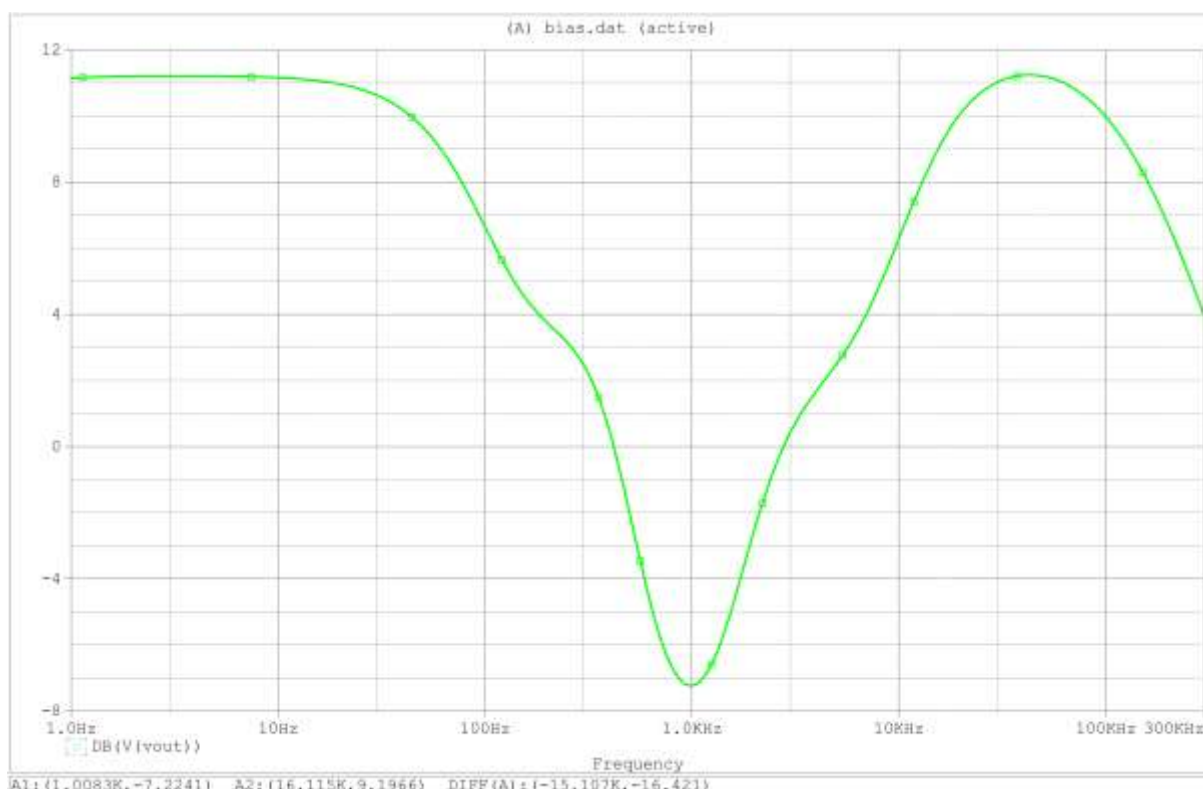
Obrázek 2.7: Modulová přenosová charakteristika ovlivněná průběhem vedlejšími pásmy

V další simulaci byl rozmítán odpor R_{18} . Tento odpor má vliv na chování ekvalizéru ve vyšších kmitočtech. Především se projevuje znatelné zesílení v kmitočtové oblasti 20 kHz až 40 kHz. Rozmítané hodnoty odporu jsou $R_{\text{rozm}} = (3,9 ; 7,8 ; 15,6 ; 39) \text{ k}\Omega$. Mezní kmitočet se mění a zároveň se mění převýšení na daných kmitočtech. Z výsledků simulace byl odpor R_{18} nahrazen hodnotou 7,8 k Ω místo hodnoty 4,7 k Ω uvedené v lit. [5]. Odporu $R_{18} = 7,8 \text{ k}\Omega$ odpovídá tmavě modrá křivka, maximální hodnotě odporu v simulaci odpovídá světle modrá křivka. Výsledek simulace ukazuje Obrázek 2.8.



Obrázek 2.8: Modulová přenosová charakteristika při různé hodnotě odporu R_{18}

Obrázek 2.9 ukazuje výsledek nastavení potlačení středních kmitočtů a zdůraznění kmitočtů krajních. Rozdíl zesílení a potlačení činí $A_{roz} = 16$ dB. Tento graf je výsledkem nastavení potenciometrů krajních hodnot na 90 % a vedlejších 75 %, zároveň pro frekvenci $f_3 = 1$ kHz na 10 %. Je zde patrná nelinearita mezi nastavenou hodnotou potenciometru a výslednou charakteristikou.

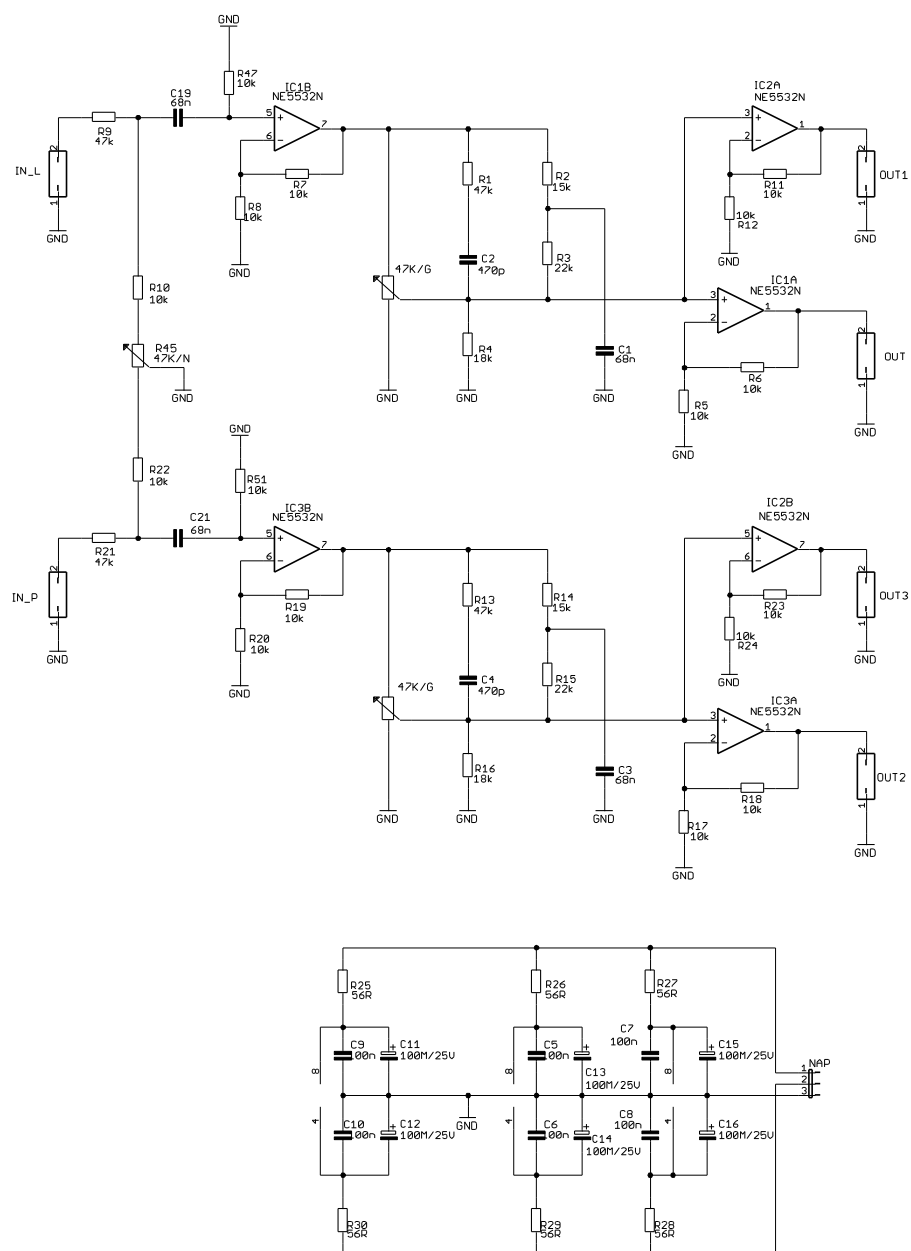


Obrázek 2.9: Modulová přenosová charakteristika ekvalizéru pro potlačení středních kmitočtů

Obrázek 2.10 je výsledkem výpočtu pracovních bodů celého zapojení. Podle výpočtu proudů součástkami je zajímavým výsledkem odběr proudu ze zdroje. Tuto skutečnost ukazuje Obrázek 2.11 a tedy maximální odebíraný proud tranzistoru ze zdroje je $I_{\text{nap}} = 7,5 \text{ mA}$.

2.2.6 Fyziologická regulace hlasitosti

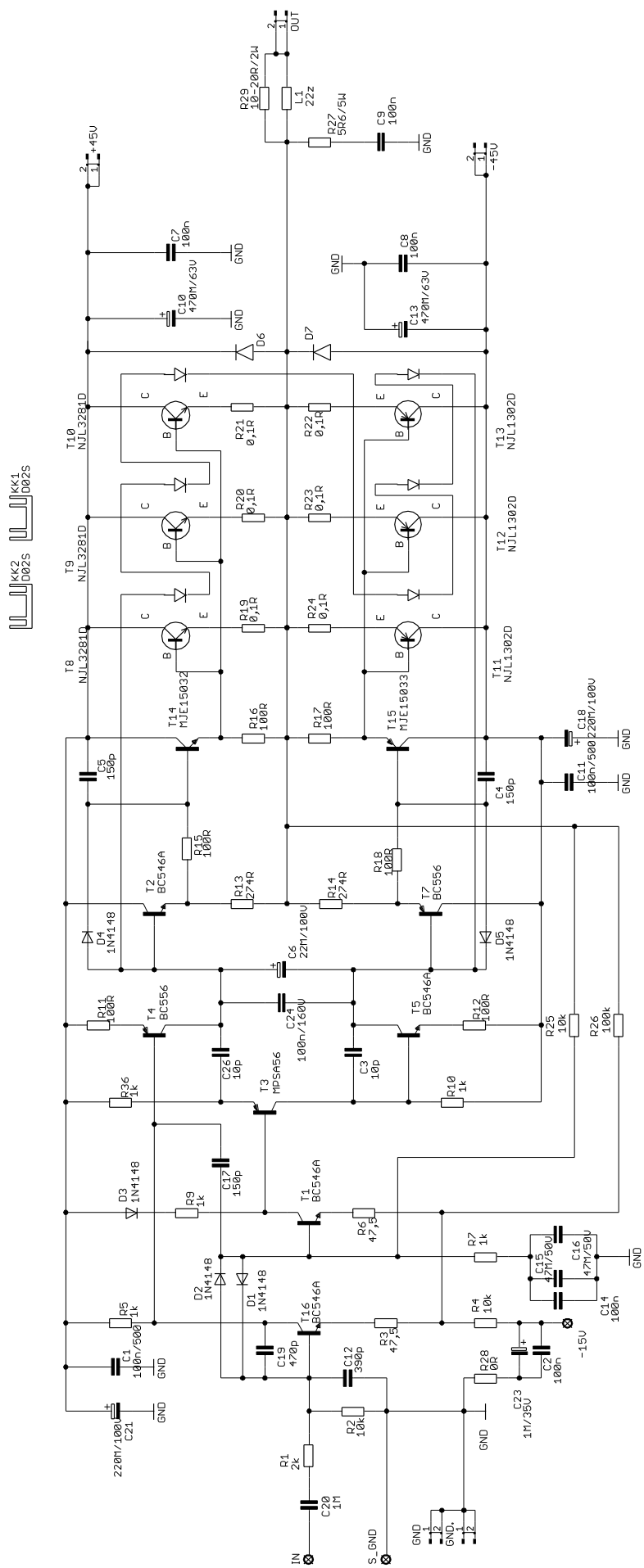
Fyziologická regulace hlasitosti slouží k úpravě audio signálu pro lepší subjektivní vnímání hudby. Schéma bylo vybráno z lit. [1] a následně upraveno pro vlastní požadavky. Modul regulace hlasitosti má za úkol dle nastavení potenciometru P_1 měnit úroveň signálu na vstupu pro operační zesilovače. Článek z prvků C_1 , C_2 , R_1 , R_2 a R_4 spolu s logaritmickým potenciometrem tvoří korekční článek, jehož přenos je frekvenčně závislý. Největší vliv na úroveň signálu má však potenciometr P_1 . Tato regulace není lineární v celé kmitočtové oblasti, ale při nižších úrovních signálu jsou zdůrazněny nízké kmitočty a zároveň vysoké kmitočty. Při vyšší poloze jezdce P_1 je tato regulace téměř lineární. Tento regulátor by měl eliminovat nedostatky lidského sluchu, protože lidský sluch není lineární pro různé hladiny akustického signálu. Nejcitlivější je lidský sluch na kmitočtech okolo tisíce Hertzů. Proto je třeba oblast této frekvence při malých signálech potlačit a zároveň zesílit postranní pásma, aby v hudbě nebyl pouze slyšet důrazně hlas zpěváka a nástroje v tomto kmitočtovém pásmu. Schéma je na obr. 4.10, Vstup signálu je na svorce IN a výstup signálu pro buzení koncového zesilovače je ze svorky OUT. Modul je napájen symetricky $U_{\text{nap}} = \pm 15 \text{ V}$. Schéma ukazuje Obrázek 2.12., DPS Obrázek 5.11, rozmístění součástek Obrázek 5.10, seznam použitých součástek je v tabulce 5.8.



Obrázek 2.12: Schéma zapojení fyziologické regulace hlasitosti

2.2.7 Koncový stupeň zesilovače

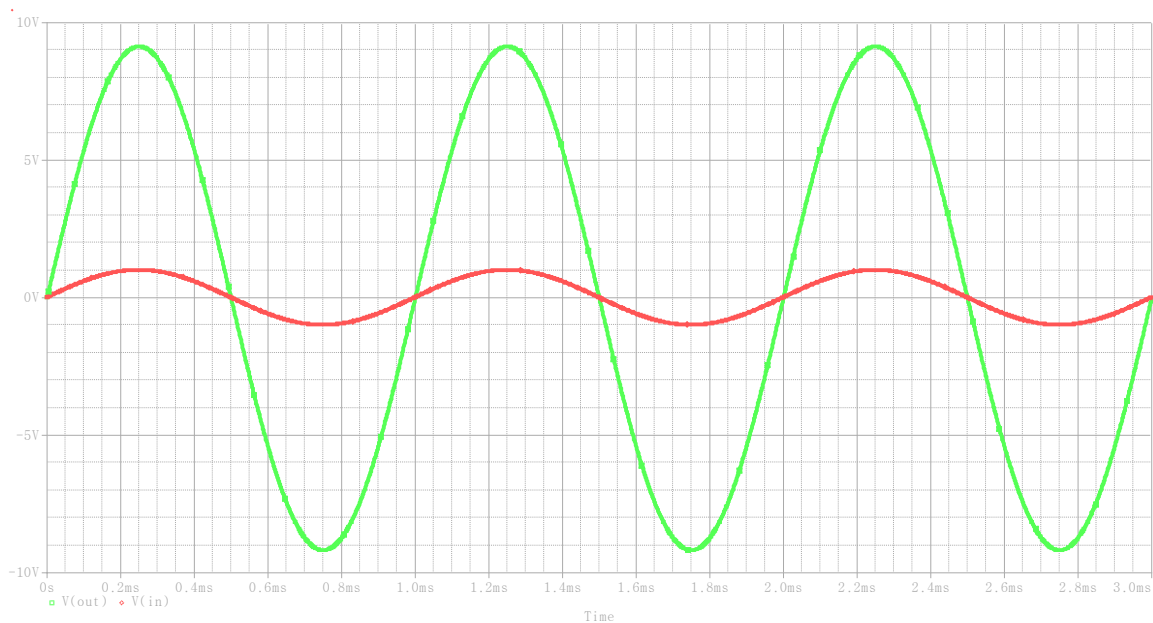
Při návrhu konstrukce koncového zesilovače se vycházelo z lit. [13]. Firma ON Semiconductor zveřejnila schéma zesilovače s použitím tranzistorů ThermalTrak. Zapojení je velmi podobné ostatním výkonovým zesilovačům pracujících ve třídě AB. Jsou zde odlišnosti, které jsou zásadní pro správnou funkci zesilovače. Na vstupu koncového zesilovače je člen upravující vstupní impedanci, tvořený pomocí rezistoru R_2 , dále je zde kondenzátor C_{20} jako ochrana před stejnosměrným proudem. Rezistor R_1 a kondenzátor C_{12} tvoří dolní propust, omezující frekvenční modulovou charakteristiku. Kondenzátor C_{19} byl přidán na základě praktického testování, kdy bylo touto úpravou zabráněno kmitání následujícího stupně diferenčního zesilovače. Tranzistory T_1 a T_{16} tvoří zapojení diferenčního zesilovače. Zlepšení parametrů diferenčního zesilovače by se mohlo dosáhnout tepelným svázáním T_1 a T_{16} . Tranzistory T_2 a T_7 zesilují proud v mezistupni zesilovače pro buzení tranzistorů T_{14} a T_{15} , které budí koncový stupeň osazený tranzistory ThermalTrak. Pracovní bod celého zesilovače je nastaven proudem tekoucím rezistorem R_4 . Pracovní bod je tepelně stabilizován šesticí sériově zapojených diod implementovaných v pouzdře výkonových tranzistorů. Dioda D_3 spolu s R_9 se podílí na nastavení pracovního bodu tranzistoru T_3 . Tranzistory pracující v komplementárním zapojení je vhodné párovat na stejný úbytek přechodu báze-emitor. Dioda D_6 a D_7 slouží jako přepěťová ochrana. Je zde Boucherotův člen tvořený z C_9 a R_{27} . Ke kompenzaci frekvenční charakteristiky slouží člen tvořený R_{29} a L_1 . Odpor R_{25} je zapojen ve zpětné vazbě a určuje zesílení celého zesilovače. Dané napěťové zesílení je nastaveno na $A_{zes} = 20$ dB. Schéma ukazuje Obrázek 2.13. Osazovací plán obrázek Obrázek 5.12, DPS Obrázek 5.13, seznam použitých součástek Tabulka 5.9..



Obrázek 2.13: Schéma koncového stupně zesilovače

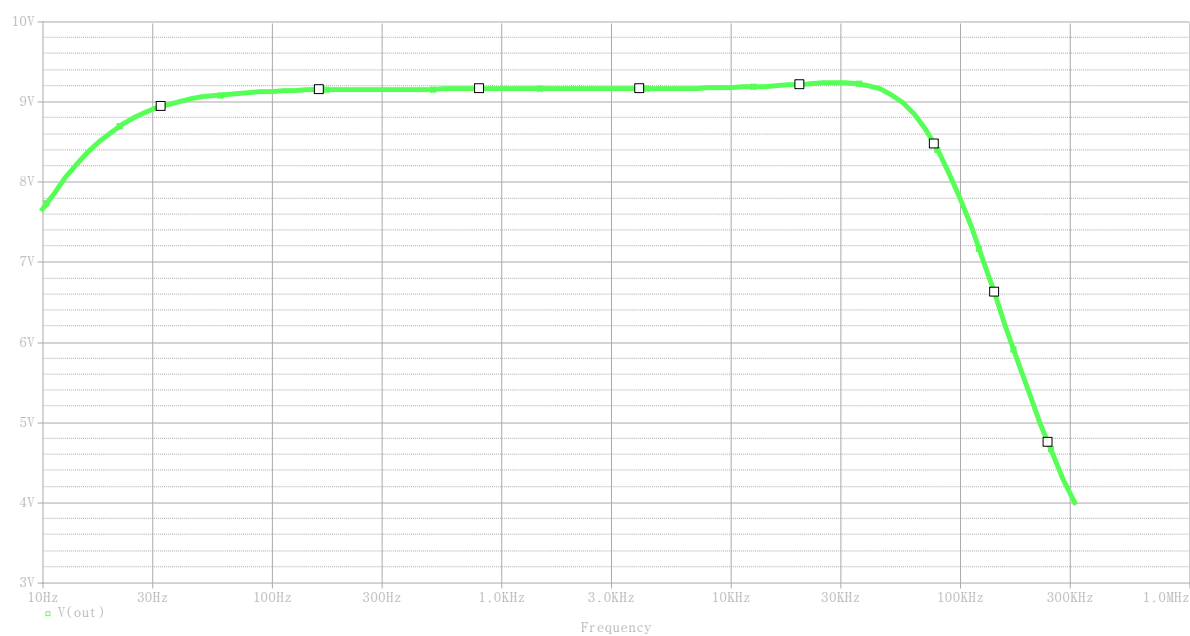
2.2.8 Simulace zesilovače

Obrázek 2.14 je výsledek simulace pro časovou odezvu. Na Vstupu zesilovače byl připojen harmonický signál funkce sinus o frekvenci $f_{in} = 1 \text{ kHz}$. Amplituda signálu na vstupu je $U_{in} = 1 \text{ V}$, na výstupu $U_{out} = 9,59 \text{ V}$, zesílení je $A_{zes} = 9,59$. Na signálu není patrné zkreslení ani limitace.

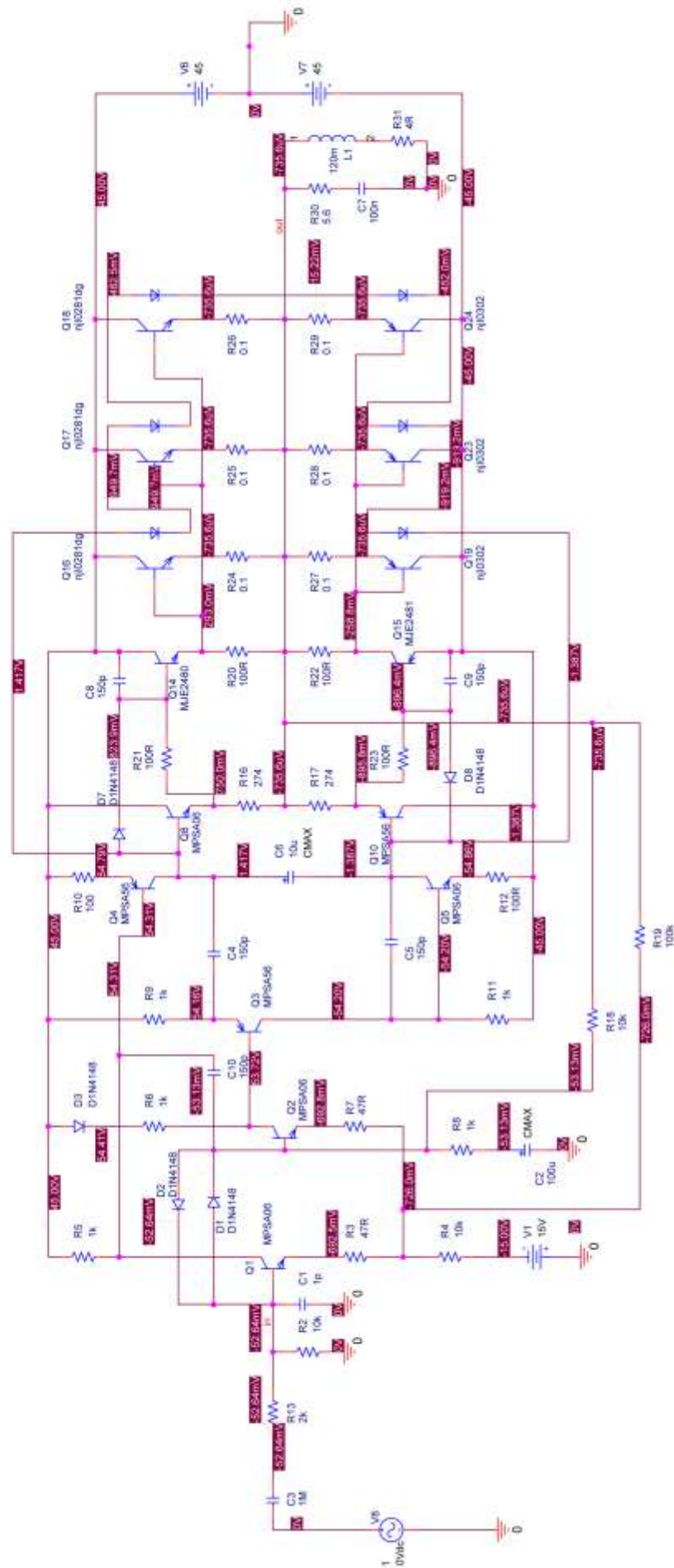


Obrázek 2.14: Časová odezva koncového stupně zesilovače

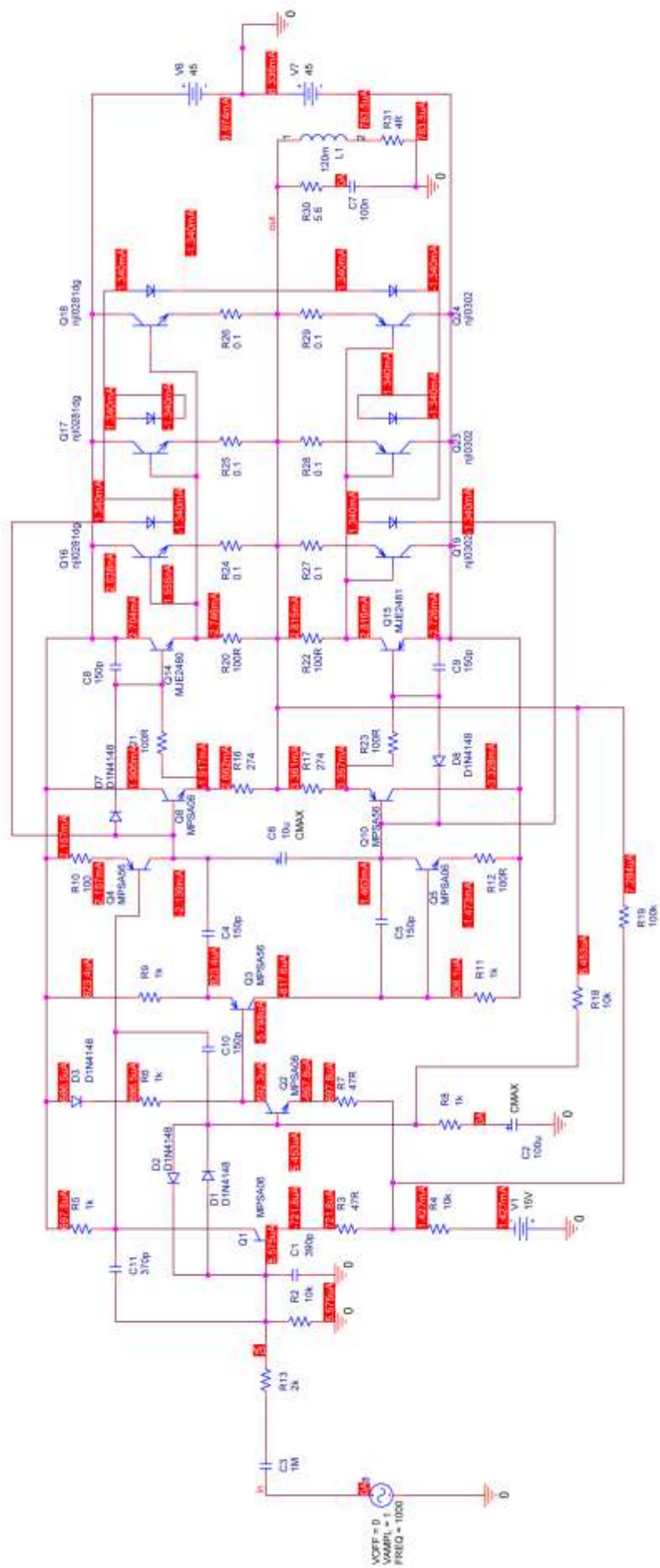
Obrázek 2.15 ukazuje frekvenční modulovou charakteristiku, při použití hodnot součástek udané v lit. [12] a úpravě schématu zapojení. Upravené schéma zapojení je ukazuje Obrázek 2.16, v dané simulaci jsou i výsledky výpočtu pracovního bodu zesilovače. Podle výsledků by měl mít zesilovač vyrovnanou frekvenční modulovou charakteristiku, výstupní stejnosměrné napětí $U_{ssvyst} = -735 \text{ } \mu\text{V}$. Obrázek 2.17 ukazuje proudové poměry v zapojení. Celkový odběr v klidovém stavu není větší jak $I_n = 10 \text{ mA}$. Předpětí báze výkonových tranzistorů ThermalTrak je $U_{bk} = 271,5 \text{ mV}$ pro kladnou větev a $U_{bz} = -284,6 \text{ mV}$ pro zápornou větev. Z toho lze odvodit, že se jedná o zapojení zesilovače pracujícího ve třídě AB.



Obrázek 2.15: Frekvenční modulová přenosová charakteristika koncového stupně zesilovače



Obrázek 2.16: Schéma pro simulaci a výsledky pro výpočet pracovního bodu



Obrázek 2.17: Schéma zapojení pro simulaci odběrů z napájecího zdroje

2.2.9 Tranzistory ThermalTrak

Tranzistory ThermalTrak uvedla firma ON Semiconductor na trh v roce 2004, podle lit. [4]. Jedná se bipolární výkonové tranzistory, které jsou ideálním prvkem pro osazení koncového stupně zesilovače. Každý tranzistor má v jednom pouzdru obsažen samotný pnp nebo npn přechod a zároveň je zde dioda, která má stejnou tepelnou závislost jako přechod báze-emitor. Dioda je rovněž co nejbližší samotnému čipu tranzistoru. Tímto způsobem je tepelná setrvačnost přechodu tepla co nejmenší. Při změně teploty tranzistoru se mění i jeho parametry, především vodivost. Čím je čip tranzistoru teplejší, tím je více polovodič vodivý. Tento jev není žádoucí u zařízení, kde očekáváme stabilitu celého zařízení a neměnnost parametrů. Nabízí se tedy řešení použít diodu implementovanou do pouzdra k regulaci pracovního bodu. Je možné ji zapojit do zdroje předpětí, nebo jako zpětnou vazbu při nastavení pracovního bodu zesilovače. Při zahřátí tranzistoru se stejně a velmi rychle ohřeje i dioda, která rovněž mění své parametry, především svoji vodivost. Při optimálním zapojení této diody se docílí teplotní stabilizace zesilovače, protože pracovní bod bude zpětnou vazbou udržován na požadované úrovni. Tato přednost spolu s ostatními parametry činí tranzistory ThermalTrak zajímavým prvkem pro konstrukci zařízení, kde je požadavek na stabilitu zařízení. Podle lit. [12] mají tranzistory dané vlastnosti:

Výhody:

- Eliminace změn parametrů a pracovního bodu v závislosti na teplotě.
- Snížení počtu obvodových prvků při nastavování pracovního bodu.
- Automatická regulace zpětné vazby při optimálním zapojení.
- Menší ekonomické náklady díky ušetřeným součástkám ve zpětné vazbě.
- Větší reprodukovatelnost samotného bloku zesilovače a jeho kompaktnost.

Použití tranzistorů:

- Audio zařízení, především zesilovače.
- Profesionální audio zesilovače.
- Další libovolné použití jinde, kde je zapotřebí teplotní kompenzace.

Veškeré informace o parametrech jednotlivých tranzistorů ThermalTrak jsou podrobně popsány v lit. [12].

2.2.10 Ochrana reproduktorů

Připojené reproduktory k zesilovači je třeba ochránit před zničením v důsledku poruchy zesilovače. Při poruše koncového stupně a následně připojení napájecího napětí na svorce reproduktoru může zničit připojený reproduktor. K účelu ochrany slouží obvody ochrany. Obrázek 2.18 znázorňuje schéma modulu ochrany před stejnosměrným napětím. V lit. [1] je návrh na modul ochrany, který byl upraven a poté použit. Je použita část schématu a zároveň je modifikována pro vlastní koncový stupeň. Princip spočívá v hlídání stejnosměrného napětí na výstupu zesilovače pomocí RC článku. Tento článek je navržen, aby propustil kmitočty nad $f = 20$ Hz při maximálním výstupním výkonu zesilovače. Jakmile je frekvence nižší, tedy i stejnosměrná složka, tak na kondenzátoru C_1 a C_4 vzniká úbytek napětí vlivem vzrůstu impedance kondenzátorů. Napětí je přivedeno na komparátor, který porovnává hodnotu větší, než nastavená mezní hodnota. Při překlopení komparátoru do kladných hodnot je sepnut tranzistor Q_2 , který sepne monostabilní klopný obvod s časovací konstantou $\tau_{\text{čas}} = 2$ s. Tento MKO sepne tranzistor Q_3 , tím uzemní řídicí signál RELE_SP. Následně připojené relé rozpojí své spínací kontakty a tím odpojí reproduktory od zesilovače. Dále je stav vyhodnocen obvodem řízení zesilovače, jedná se o kladný napěťový impuls na svorce OUT_PULZ_ATMEL. V důsledku poruchy se odpojí napájecí zdroje koncového stupně zesilovače. Porucha je indikována LED D_{15} na předním panelu zesilovače. Zenerovy diody D_{11} a D_{12} slouží jako ochrana operačního zesilovače, aby napětí na vstupu nebylo větší, než povolená mezní hodnota operačních zesilovačů. Při sestavení obvodu na pájivém kontaktním poli za účelem vyzkoušení, bylo zjištěno, že obvod může rušit do jiných citlivých částí zesilovače. Především v důsledku překlápění komparátoru při hodnotách frekvence blízkých se kritické hodnotě mezní frekvence. Na výstupu komparátoru tak vznikaly velice úzké impulzy. Z důvodu odrušení je obvod napájen ze zdroje pro číslicovou část, který není společný pro analogovou část zesilovače. Rozložení součástek modulu ukazuje Obrázek 5.14, DPS Obrázek 5.15. Seznam použitých součástek ukazuje Tabulka 5.10. Hodnota napájecího napětí je $U_{\text{nap}} = \pm 12$ V.



2.3 Řízení zesilovače

V kapitole je uvedeno jak a čím bude funkce celého zesilovače řízena. Zároveň je zde popis komunikace zesilovače s externími zařízeními.

2.3.1 Důvody řízení zesilovače

V zesilovači je více modulů, které vykonávají různé funkce a je třeba tyto moduly řídit, především zpracovávat stavy získané těmito bloky. Například modul ochrany reproduktorů, který dává informaci o stavu koncového zesilovače, zejména v případě poruchy. Tento stav je vhodně vyhodnocen samotným programem a reakce může být optimální z hlediska zabránění další poruchy. V tomto případě ochránění připojených reproduktorů nebo odpojení napájení zesilovače a následná indikace poruchy na předním panelu zesilovače. Další důvod řízení zesilovače je optimální start zesilovače z vypnutého do zapnutého stavu. Tento postup je důležitý z hlediska elektrické kompatibility ze strany napájecí sítě. Kdyby byl zesilovač zapnut přímo do napájecí sítě, tak je zde pravděpodobnost vypnutí jističe v síti. Tato skutečnost byla v praxi ověřena. Toroidní transformátor má veliký magnetizační proud a tento proud je třeba omezit. Při omezení se zároveň prodlužuje životnost dalších prvků v zesilovači, jako například životnost hlavního spínače. Pomalý náběh proudu je vhodný i ze strany sekundárního vinutí toroidního transformátoru. Protože je transformátor zdroj tvrdého napětí, tak kapacity, které jsou ve zdroji stejnosměrného napětí představují ve vybitém stavu zkrat. Nabíjení kapacit zkratovým proudem zkracuje životnost usměrňovacího můstku i kapacit samotných. Modul řízení také vyhodnocuje teplotu, spouštěcí podmínky a vyhodnocení vnějších podmínek. Největší výhodou řízení zesilovače programem je snadná adaptace a optimalizace celého zesilovače změnou programu, nebude tedy třeba zasahovat do vrstvy hardware.

2.3.2 Popis schématu

Zesilovač bude řízen programem. Program bude nahrán do mikrokontroléru ATMEL ATtiny 2313 [7]. Samotné programování bude v programu AVR Studio 4, pomocí jazyku C pro AVR. Pracovní frekvence jádra bude $f_{\text{prac}} = 10 \text{ MHz}$. Podklady pro samotnou výrobu programátoru a uvedení do funkčnosti, včetně potřebných programů a ovladačů, jsou uvedeny v lit. [9]. Studijní materiály, ze kterých se vycházelo při samotném programování, jsou převzaty z lit. [10] a [11]. Návrh hardwarové části se opíral o uvedené fakta z katalogového listu firmy Atmel viz lit. [7]. Schéma obsahuje několik samostatných celků, kde středem je mikrokontrolér. Zesilovač bude možné provozovat v režimu pohotovostním, což znamená, že bude připojen do napájecí sítě, ale bude napájen pouze modul řízení. Spuštění nastane dotykem na dotykovou plochu DOTYK_PLOCHA. Dotkový spínač je realizován integrovaným obvodem IO_1 NE555. Tento obvod je zapojen jako velice citlivý spínač. Stačí dotyk lidské ruky na plošku a obvod se překlápí. Výsledkem překlopení je pulz, tento pulz je ošetřen proti zákmitům RC článkem. Pulz je přiveden na vstup IC_1 . IC_1 zapojený jako D-flop plní funkci děliče frekvence dvěma. Tedy prvním dotykem je na výstupu D-flopu *logická 1* a při druhém dotyku je na výstupu *logická 0*. Tyto úrovně odpovídají zapnutí, nebo vypnutí zesilovače. Pulz z D-flopu je přiveden na port *D* pin 0 mikrokontroléru Atmel. Mikrokontrolér tento stav vyhodnotí a zároveň bude porovnávat, zda je v zesilovači porucha. Pokud není, je zahájen start zesilovače. Tento stav je indikován zelenou LED diodou. Spuštění začne sepnutím RLY_2 , tím se připojí síťové napětí na ostatní transformátory ve zdroji. Na toroidní transformátory je toto napětí přivedeno přes omezovací výkonný odpor. Po krátké době $t_{\text{nabeh}} = 500 \text{ ms}$ se sepne RLY_1 , to způsobí přímé připojení síťového napětí na toroidní transformátor. Program se stále dotazuje, zda je v zesilovači porucha, pokud není, pokračuje se sepnutím $RELE_ZDROJ_1$ a $RELE_ZDROJ_2$. V tomto případě dojde k sepnutí relé ve zdroji pro napájení koncového stupně zesilovače a zdroj je připojen přímo na toroidní transformátor. Pokud je vše v pořádku, myšleno nenastala porucha, je po určitém čase sepnuto $RELE_REPRO$. To způsobí připojení reproduktorů k zesilovači. Při vypnutí zesilovače se postupuje přesně opačně, avšak v jiných dobách odpojení kotvy relé. Modul řízení obsahuje i druhé dotykové spínání, které má za následek vypnutí všech LED diod na předním panelu, krom LED diod indikujících poruchy. Tento stav je zde z důvodu nerušení uživatele zapnutým podsvětlením zesilovače, např. při sledování televize. Obrázek 2.19 ukazuje schéma zapojení, DPS Obrázek 5.17, rozložení součástek Obrázek 5.16, Tabulka 5.11: Seznam součástek modulu řízení zesilovače.

2.3.3 Komunikace se zesilovačem

Důležitou vlastností modulu je snadné přeprogramování. Z toho důvodu bude na zadním panelu zesilovače konektor RJ-45. Přes konektor bude zaručena konektivita mezi programátorem a samotným mikroprocesorem. Programování bude probíhat pomocí 5ti vodičů. MISO, MOSI, SCK, RESET a GND. Programování může probíhat i bez vyjmutí mikrokontroléru z patice, což je velice výhodné na obsluhu a optimalizaci programu. Ve schématu je i návrh na komunikaci s dalšími zařízeními, především dalším zesilovačem. Tato komunikace může probíhat přes konektor MUTE. Signálem na tomto konektoru se vypne zvuk na dalších zesilovačích. Dalším konektorem OUT_PULZ bude možné zapínat další externí zařízení nebo i samotný zesilovač. Tyto konektory nebudou přímo připojeny s externím zařízením, ale přes optickou vazbu realizovanou např. optočleny. Z důvodu neuzavírání smyček zemního vodiče. Dalším konektorem I2C je možné komunikovat pomocí sběrnice I2C. K tomu slouží pin SCL a SDA. Tato komunikace je zde přichystána pro další externí zařízení a nabízí rozsáhlé možnosti využití této sběrnice a rozšíření externích zařízení na větší počet, protože sběrnice využívá adresování zařízení. Postup programování komunikace I2C je popsán v lit. [10].

2.3.4 Program řízení zesilovače

Program byl napsán na základě poznatků lit. [7]. Dále bylo využito znalostí praktických ukázek z lit. [8], [9], [11].

```
#define F_CPU 1000000L           // definování krystalu

#include<avr/io.h>               //knihovna na vstupy a výstupy
#include<util/delay.h>          //knihovna zpoždění
#include<stdio.h>               //standardní knihovna
#include "bitove_operace.h"
#define bit_is_clear(sfr,bit)  (!(_SFR_BYTE(sfr) & _BV(bit)))

//knihovna realizující změnu bitu v registru při nedotčení ostatních
//bitů v daném registru
int zapnuto, vypnuto, teplota, tma, ochrana; // definice proměnných
int pom=0;

int main (void)
{
  DDRB=255;                     // port B jako výstupní
  DDRD=0b1010010;              // nastavení portu D jako vstupně vstupní
  PORTB=0;                     // port B roven 0
  _delay_ms(500);              // zpoždění 500 ms
  PORTB=0b10000000;            // test LED zelená
  _delay_ms(500);              // zpoždění 500 ms
  PORTB=0;                     // port B roven 0
```

```

_delay_ms(500);          // zpoždění 500 ms
zapnuto=0;               // proměnná zapnuto vynulována
pom=0;                   // proměnná pom vynulována
ochrana=0;               // proměnná ochrana vynulována
PORTB=0b00100000;        // port B pin 5 v log 1

while(1){                // nekonečná smyčka
if(bit_is_set(PIND,3))    // testování zda je na portu D pinu 3 log 1
{
    PORTB=0b10100000;    // vypnutí toroidních transformátorů, rozsvícení
                        //LED zelená a LED červená
    ochrana=1;           // nastavení proměnné ochrana
}

if(bit_is_clear(PIND,3))  // testování zda je na portu D pinu 3 log 0
{
    ochrana=0;           // vynulování proměnné ochrana
}

if(bit_is_set(PIND,2))    //testování zda je na portu D pinu 2 log 1
{
    teplota=1;           // nastavení proměnné teplota
}

if(bit_is_clear(PIND,2))  //testování zda je na portu D pinu 2 log 0
{
    teplota=0;           // vynulování proměnné teplota
}

if(bit_is_set(PIND,0) && zapnuto==0) //testování zda je na portu D pinu 0
                                //log 1 a zároveň proměnná zapnuto v 0

{
    zapnuto=1;           // nastavení proměnné zapnuto
    pom=1;               // nastavení proměnné pom
}

if(bit_is_set(PIND,5))    //testování zda je na portu D pinu 5 log 1
{
    tma=1;               // nastavení proměnné tma
}

if(bit_is_clear(PIND,5))  //testování zda je na portu D pinu 5 log 0
{
    tma=0;               // vynulování proměnné tma
}

if(zapnuto==1 && teplota==0 && pom==1) //testování zda je proměnná zapnuto
//rovna 1 a zároveň teplota rovna 0 a zároveň proměnná pom v 1
{
    PORTB=0b10000000;    // zelená LED
    _delay_ms(250);      // zpoždění 250 ms
    PORTB=0;             // port B vynulován
    PORTB=0b01000000;    // žluta LED
    sbi(PORTB,3);        // zapnutí relé 1C => 1K
    _delay_ms(500);      // zpoždění 500 ms
}

```

```

sbi(PORTB,2);          // zapnutí relé 2C => 2K

    if(ochrana==0)      // testování proměnné ochrana
    {
        _delay_ms(1000); // zpoždění 1 s
        sbi(PORTB,1);     // zapnutí relé ve zdroji +-45V
        _delay_ms(500);   // zpoždění 500 ms
        sbi(PORTB,0);     // zapnutí RELE_REPRO
        cbi(PORTB,6);     // zhasnutí žluté LED
        sbi(PORTB,7);     // zelena LED
        zapnuto=1;        // proměnná zapnuto nastavena
        pom=0;            // zesilovač zapnut
        sbi(PORTD,1);     // pulz EXT_ZAP
    }

}

if(bit_is_clear(PIND,0) && zapnuto==1) // vypínání zesilovače
{
    PORTB=0b00100000;      // červená LED
    _delay_ms(250);        // zpoždění 250 ms
    PORTB=0b01000000;      // žlutá LED
    cbi(PORTB,0);          // port B pin 0 vynulován
    _delay_ms(250);        // zpoždění 250 ms
    cbi(PORTB,1);          // port B pin 1 vynulován
    _delay_ms(250);        // zpoždění 250 ms
    cbi(PORTB,2);          // port B pin 2 vynulován
    _delay_ms(250);        // zpoždění 250 ms
    cbi(PORTB,3);          // port B pin 3 vynulován
    cbi(PORTB,6);          // port B pin 6 vynulován
    PORTB=0b00100000;      // červená LED
    zapnuto=0;             // vynulování proměnné zapnuto
    cbi(PORTD,1);          // vypnutí EXT_ZAP
}

}

}

```

2.4 Napájecí zdroje

Kapitola pojednává o návrhu napájecích zdrojů zesilovače. Součástí je návrh a popis schématu. Jsou zde řešeny základní výpočty důležitých parametrů zdroje.

2.4.1 Zdroj pro číslicovou část

Zdroj v zesilovači je rozdělen na několik samostatných celků. Z důvodu různých napěťových hladin, proudových odběrů, ale i kvůli odizolování jednotlivých zdrojů a tím i zamezení přeslechů a rušivých složek mezi číslicovou částí a analogovou částí. Zdroje jsou naddimenzovány podle odběrů jednotlivých modulů. Zdroj pro číslicovou část obsahuje transformátor s výkonem $P_{tr} = 10 \text{ VA}$. Transformátor je s dvěma sekundárními vinutími o hodnotě napětí $U_v = 12 \text{ V}$, kde hodnota $U_{max} = 16,9 \text{ V}$ je hodnota po usměrnění a vyhlazení při použití usměrňovacího můstku. Odběr kladné větve je spočten na $I_o = 740 \text{ mA}$. Viz tabulka Tabulka 5.1 a Tabulka 5.2. Maximální dovolená mez transformátoru je $I_{max} = 830 \text{ mA}$. Můstek je dimenzován na střední hodnotu $I_{av} = 2 \text{ A}$. Tepelné ztráty můstku činí $P_z = 1 \text{ W}$. Můstek bude konstrukčně umístěn na hliníkovém profilu, který bude zároveň plnit funkci obalu zesilovače. Záporná větev je realizována integrovaným stabilizátorem LM7912. Maximální tepelné ztráty činí $P_{ztr-12} = 0,25 \text{ W}$. Diody uvedené ve schématu, mimo LED diody, slouží jako ochranné prvky stabilizátorů. Transformátor je jištěn proti přetížení integrovanou tepelnou pojistkou na $t_{max} = 70 \text{ °C}$ a zároveň tavnou pojistkou dimenzovanou na efektivní hodnotu $I_{ef} = 800 \text{ mA}$. Po usměrnění následuje vyhlazovací kondenzátor o dostatečné kapacitě. Napětí je stabilizováno integrovaným stabilizátorem LM7812. Tepelné ztráty stabilizátoru jsou dány rovnicí 4.1, kde po dosazení číselných hodnot do rovnice 4.2 je výsledný ztrátový výkon $P_{ztr12} = 4 \text{ W}$. Pohotovostní režim je udržován napětím ze zdroje +5V. Tepelné ztráty stabilizátoru LM7805 se spočítají dle rovnice 4.1. Ztrátový výkon činí $P_{ztr5} = 1,4 \text{ W}$, proud stabilizátorem ukazuje Tabulka 5.3.

$$P_{ztr} = U_{io} \cdot I_z [\text{W}] , \quad (4.1)$$

po dosazení

$$P_{ztr12} = (16,9 - 12) \cdot 0,83 \approx 4 \text{ W}, \quad (4.2)$$

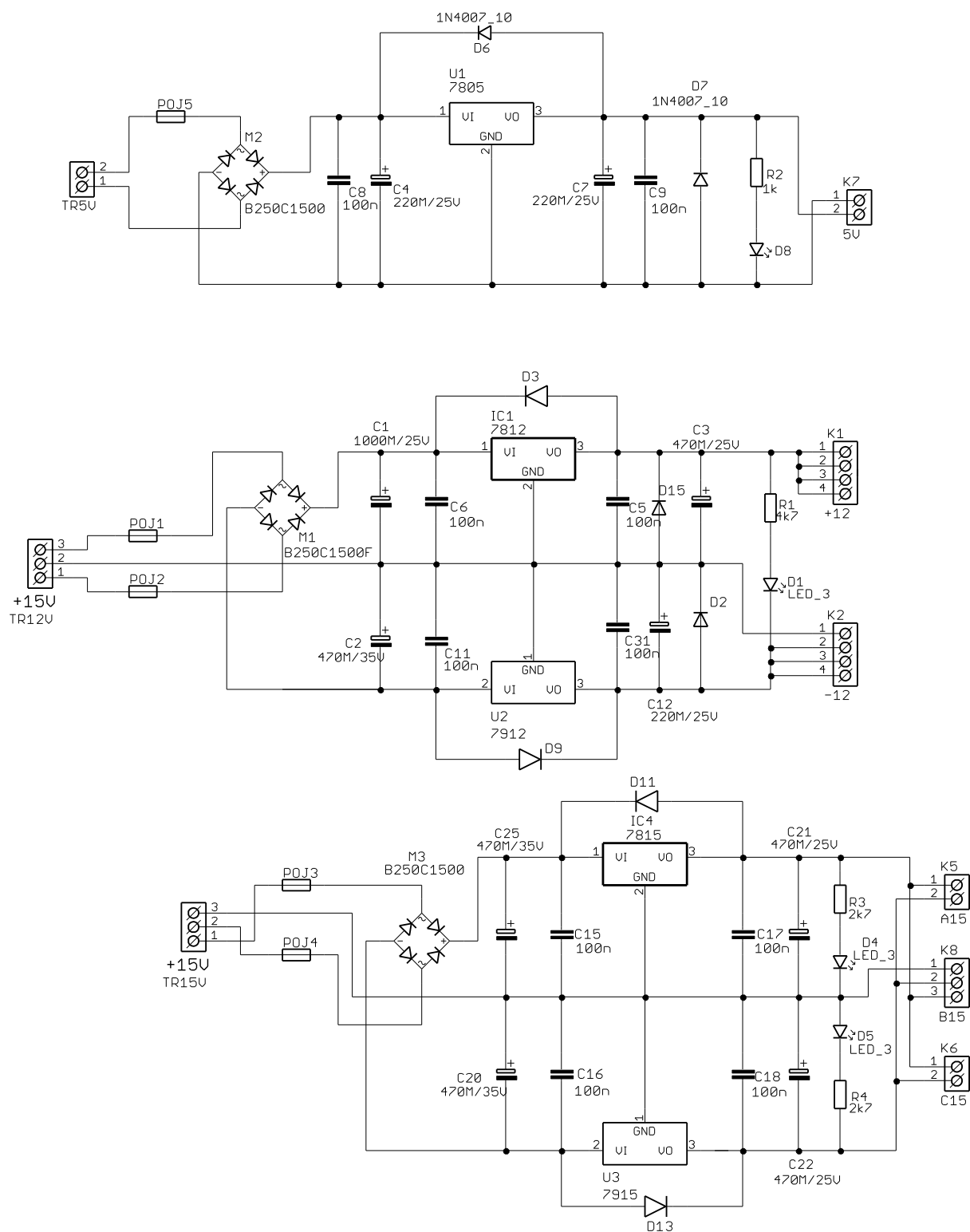
kde

U_{io} je napětí na stabilizátoru [V]

I_z je proud stabilizátorem [A]

2.4.2 Napájecí zdroj pro předzesilovače

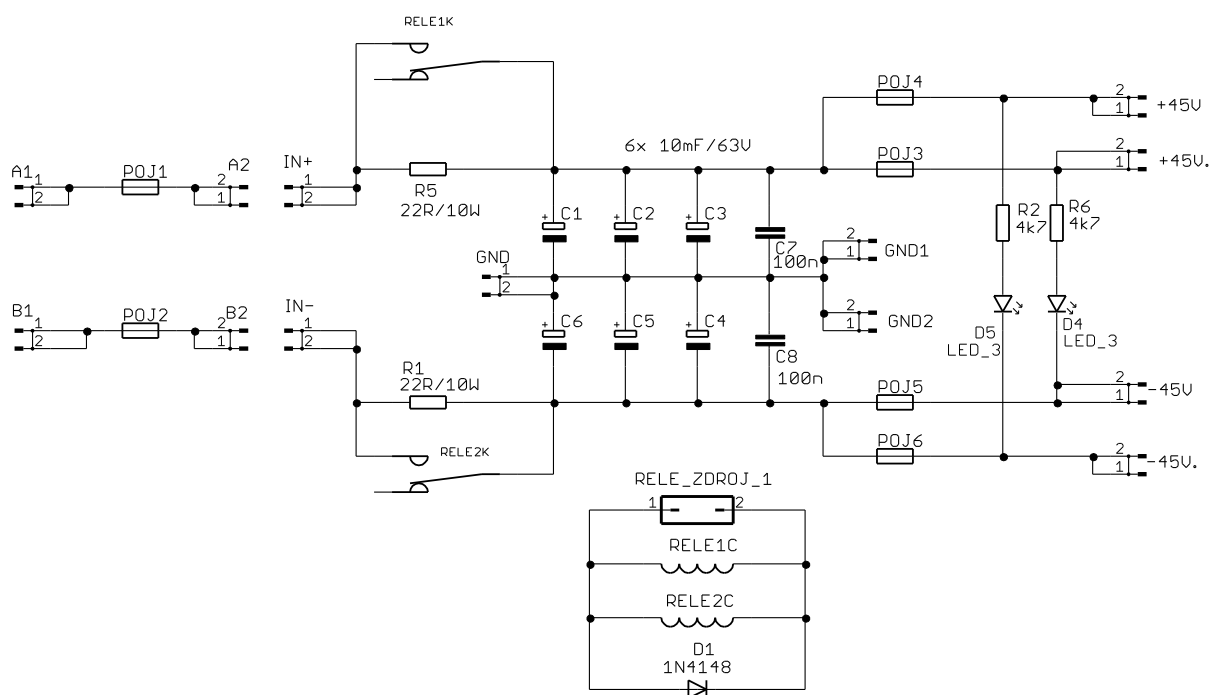
Zdroj $\pm 15\text{ V}$ je určen pro napájení analogové části zesilovače. Napětí pro operační zesilovače je stabilizováno integrovanými stabilizátory LM7815 a LM7915. Tepelná ztráta se počítá podle rovnice (4.1.) Maximální ztrátový výkon činí $P_{ztr15} = 2\text{ W}$. Vypočítaný proud stabilizátory ukazuje Tabulka 5.1. Všechny integrované stabilizátory budou připevněny na hliníkovém profilu zesilovače, tím se zajistí odvod ztrátového tepla. Schéma ukazuje Obrázek 2.20, osazovací plán Obrázek 5.18, DPS Obrázek 5.19, seznam použitých součástek Tabulka 5.12.



Obrázek 2.20: Schéma zapojení napájecího zdroje

2.4.3 Napájecí zdroj pro koncový stupeň zesilovače

Zdroj je navržen za účelem napájení koncového stupně zesilovače. Napájen bude toroidním transformátorem s výkonem $P_{tr} = 450 \text{ VA}$. Napětí na sekundárním vinutí bude symetrické s hodnotou $U_{sek} = 32 \text{ V}$. Transformátor je jištěn na sekundárním vinutí pomalou tavnou pojistkou s hodnotou $I_{poj} = 10 \text{ A}$. Usměrňovací můstek M_1 byl vybrán s ohledem na proudové špičky na proud $I_{usm} = 35 \text{ A}$. Tato hodnota je bohatě naddimenzována a přispěje tak k delší životnosti zesilovače. Za usměrňovacím můstkem následuje výkonný odpor R_1 , který je po určité době přemostěn kontaktem relé $RELE_{1K}$. Tím je zamezeno nabíjení kapacit ve zdroji zkratovým proudem. Kondenzátory C_1 až C_6 mají funkci sběrného akumulátoru energie. Celková kapacita ve větvi je $C_m = 30 \text{ mF}$. Kondenzátory C_7 a C_8 slouží jako blokovací prvek proti rozkmitání zdroje. Pojistky POJ_3 až POJ_5 jsou navrženy na proud $I_z = 8 \text{ A}$. LED diody D_4 a D_5 signalizují stav zdroje, zda nejsou při zapnutí zesilovače pojistky přepálené. Zem je řešena jako hvězdicové spojení všech ostatních prvků v zesilovači. Podstata spočívá ve spojení všech zemí do jednoho bodu. Důležité je, aby i realizace desky plošných spojů dodržovala tento postup zemnění. Schéma zapojení je ukazuje Obrázek 2.21, rozmístění součástek Obrázek 5.20, DPS Obrázek 5.21, seznam použitých součástek Tabulka 5.13.



Obrázek 2.21: Schéma zapojení zdroje pro koncový stupeň zesilovače

3 Závěr

Podle zadání byl navržen a zkonstruován zesilovač, který byl následně testován. Zařízení se skládá v několika modulů, které byly testovány a odzkoušeny. Zkreslení celého zesilovače je $THD+N_c = 0,31 \%$ při maximálním vybuzení. Výstupní výkon byl změřen $P_{\max} = 209,8 \text{ W}$ do zátěže $R_z = 4 \Omega$. Mezní frekvence je $f_{\text{mez}} = 140 \text{ kHz}$. Zesílení celého zesilovače má hodnotu $A_u = 34,74 \text{ dB}$. Schéma koncového stupně uvedené výrobcem neodpovídalo požadavkům a bylo upraveno. Koncový stupeň zesilovače při realizaci musel být dodatečně zablokován proti kmitání. Mezní frekvence přesahuje hranici požadavků na zesilovač. Při pozorování na osciloskopu bylo objeveno, že zesilovač při buzení sinusovým signálem má snahu signál zkreslovat na pilovitý průběh. Tento děj nastává za hranicí frekvence 70 kHz . Tento fakt je pravděpodobně způsoben malou rychlostí přeběhu, která činí $SR = 17 \text{ V}/\mu\text{s}$. Teoretický předpoklad teplotní stabilizace pomocí tranzistorů ThermalTrak byl ověřen a zesilovač je stabilní i za zvýšené teploty. Chybějící možnost nastavení pracovního bodu nebo výstupního napětí je zbytečná. Zesilovač po oživení má výstupní napětí v mezi do 10 mV a pracovní bod není nutné měnit. Mohutnost a bytelnost zařízení splňuje požadavek na dlouhodobou životnost. Řízení funkcí a ovládání modulů pomocí mikrokontroléru se osvědčilo a v zařízení nevznikají hazardní stavy nebo nežádoucí stavy, tento fakt přispěje k vyšší životnosti. Zesilovač je zároveň připraven pro rozšířenou komunikaci pomocí sběrnice I2C. Zařízení není zapotřebí dále upravovat, protože dává komplexní možnosti uživatelského nastavení. Výstupní výkon přesahuje zadanou hodnotu a při zkoušení v domácích podmínkách disponuje velikou rezervou. Subjektivní poslech předčil očekávání a vysoce přesahuje možnosti nabízené integrovanými zesilovači.

4 Seznam použité literatury

- [1] WIRSUM, S. *Abeceda NF techniky*. Praha: BEN-technická literatura, 2003. 191s.
- [2] KOTISA, Z. *Nf-zesilovače: 1.díl Předzesilovače*. Praha: BEN-technická literatura, 2003. 96s.
- [3] KOTISA, Z. *NF zesilovače: tranzistorové výkonové zesilovače a jejich amatérská stavba*. Praha: BEN-technická literatura, 2003. 96s.
- [4] VORÁČEK, V. *Nf-zesilovače: 4.díl Zesilovače Leach*. Praha: BEN-technická literatura, 2006. 104s.
- [5] BELZA, J. *Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky*. Praha: BEN-technická literatura, 2004. 248s
- [6] DOSTÁL, J. *Operační zesilovače*. Praha: BEN-technická literatura, 2005. 536s
- [7] Atmel [online]. United States: Atmel Corporation, 2011 – [cit. 26. Listopadu 2011]. Dostupné na www: <http://www2.atmel.com/default.aspx>
- [8] VÁŇA, V. *Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C*. Praha: BEN-technická literatura, 2009. 216s.
- [9] ZÁVODNÝ, V. Narrow freeweb [online]. 6/2011, [citováno 2011-11-20]. Dostupné na www: < <http://narrow.ic.cz/elektrotechnika/atmely/13-programator-atmel-do-usb> >
- [10] FRÝZA, T. Tomas Fryza home page [online]. 11/2011, [cit 10. Listopadu 2011]. Dostupné na www: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~fryza/index.php?Mikroprocesorov%26aacute%3B_technika_a%26nbsp%3Bembedded_syst%26eacute%3Bmy:BMPT_-_prezen%26iacute%3B_studium>
- [11] FRÝZA, T, et al. *Mikroprocesorová technika a embedded systémy: Počítačová cvičení*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2011.
- [12] ON Semiconductor [online]. Phoenix: Enabling Energy Efficient Solutions, 2011 – [cit. 11. Prosince 2011]. Dostupné na www: <http://onsemi.com/>

5 Přílohy

5.1 Příloha tabulek

Tabulka 5.1: Přehled proudových odběrů ze zdroje 15 V

zdroj ± 15 V	
modul:	proud [mA]
vstupní zesilovač	64
ekvalizér	82
regulace hlasitosti	68
celkem	214

Tabulka 5.2: Přehled proudových odběrů ze zdroje 12 V

zdroj ± 12 V		
modul:	proud [mA]	
	kladná větev	záporná větev
vstupní zesilovač	84	34
modul ochrany rep.	105	5
modul řízení	285	5
pot. přepínač	75	5
celkem	549	49

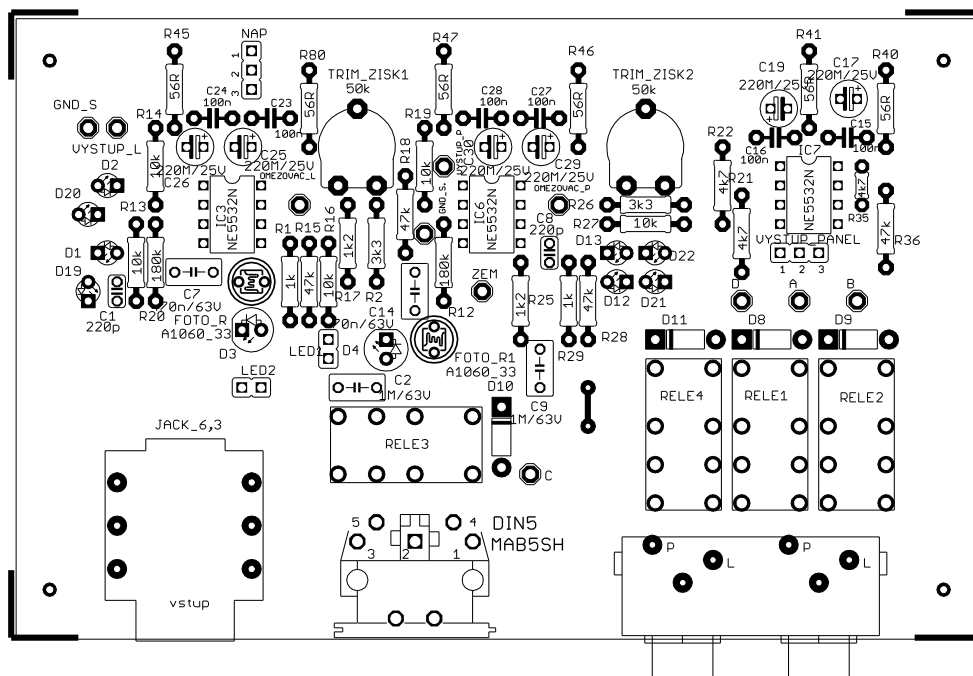
Tabulka 5.3: Přehled proudových odběrů ze zdroje 5 V

zdroj +5 V	
modul:	proud [mA]
Modul řízení zesilovače	190

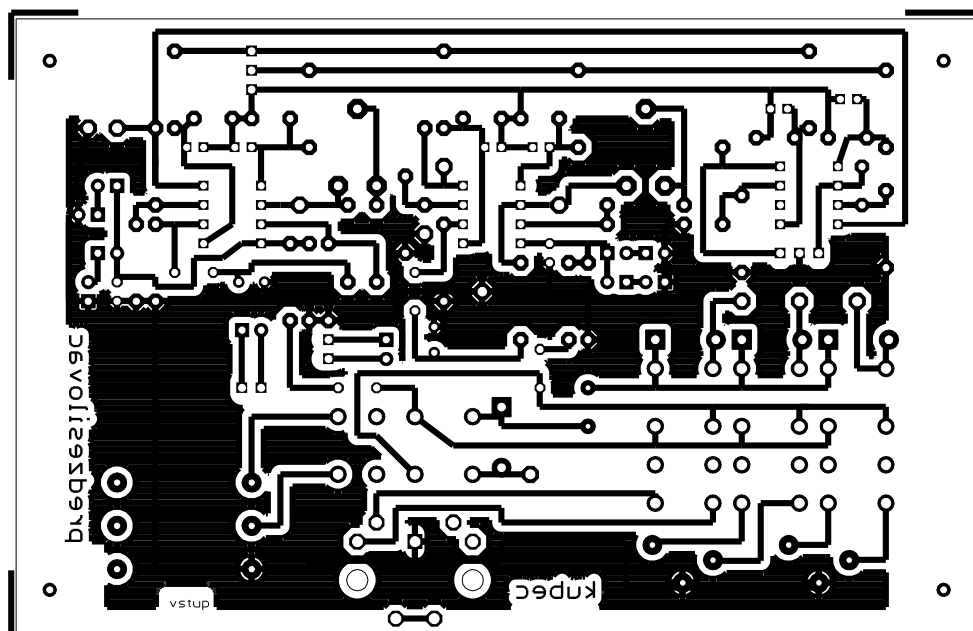
Tabulka 5.4: Přehled proudových odběrů ze zdroje 45 V, navrženo pro výkon 100W

zdroj ± 45 V		
modul:	proud [mA]	proud [mA]
výkonový zesilovač	kladná větev	záporná větev
	2200	2200

5.2 Konstrukční podklady



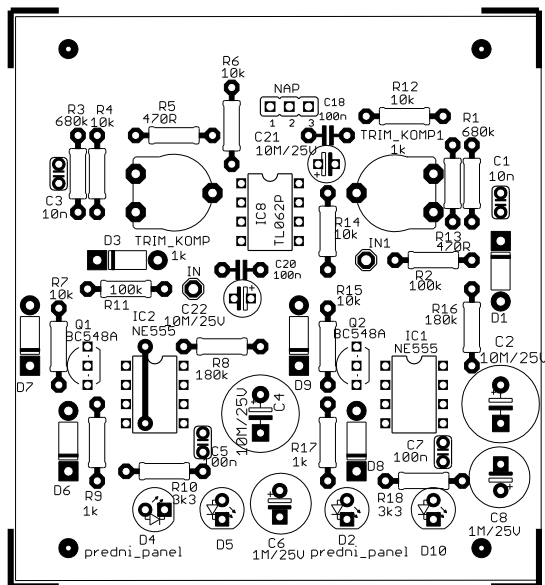
Obrázek 5.1: Rozložení součástek předzesilovače, strana TOP, 127 x 82 mm, M 1:1



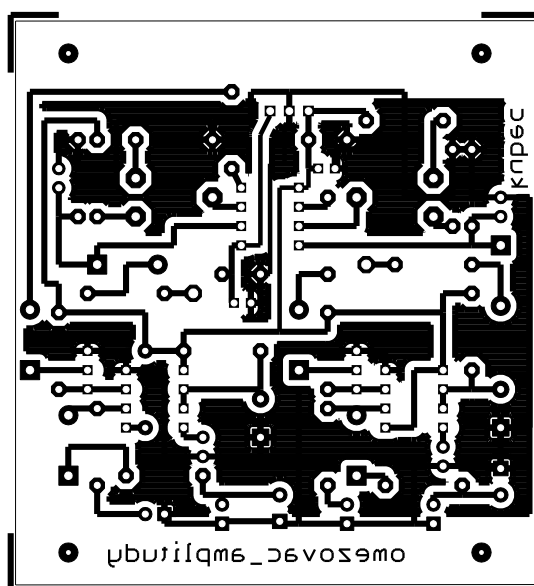
Obrázek 5.2: DPS předzesilovače, strana BOTTOM, 127 x 82 mm, M 1:1

Tabulka 5.5: seznam použitých součástek předzesilovače

Počet	Hodnota	Pouzdro	Součástka
4		1N4007	D8, D9, D10, D11
1		JACK_6,3	JACK_6,3
2		JP1Q	LED1, LED2
2		JP2E	NAP, VYSTUP_PANEL
8		LED_3	D1, D2, D12, D13, D19, D20, D21, D22
2		LED_5	D3, D4
4		RELEM4	RELE1, RELE2, RELE3, RELE4
2	1M/63V	C-EU050-035X075	C2, C9
2	1k	R-10	R1, R29
2	1k2	R-10	R17, R25
2	3k3	R-10	R2, R26
1	4k7	R-5	R35
2	4k7	R-10	R21, R22
5	10k	R-10	R13, R14, R16, R19, R27
4	47k	R-10	R15, R18, R28, R36
2	50k	PT-10_V-LEZ	TRIM_ZISK1, TRIM_ZISK2
6	56R	R-10	R40, R41, R45, R46, R47, R80
6	100n	C-5	C15, C16, C23, C24, C27, C28
2	180k	R-10	R12, R20
6	220M/25V	47M/25V	C17, C19, C25, C26, C29, C30
2	220p	C-EU025-024X044	C1, C8
2	470n/63V	C-EU050-035X075	C7, C14
2	A1060_33	A1060_33	FOTO_R, FOTO_R1
1	CINCH_4X	CINCH_4X	CINCH
1	MAB5SH	MAB5SH	DIN5
10	MCS08	MCS08	A, B, C, D, GND_S, GND_S., OMEZOVAC_L, OMEZOVAC_P, VYSTUP_L, VYSTUP_P
3	NE5532N	NE5532N	IC3, IC6, IC7
1	SE11	SE11	ZEM



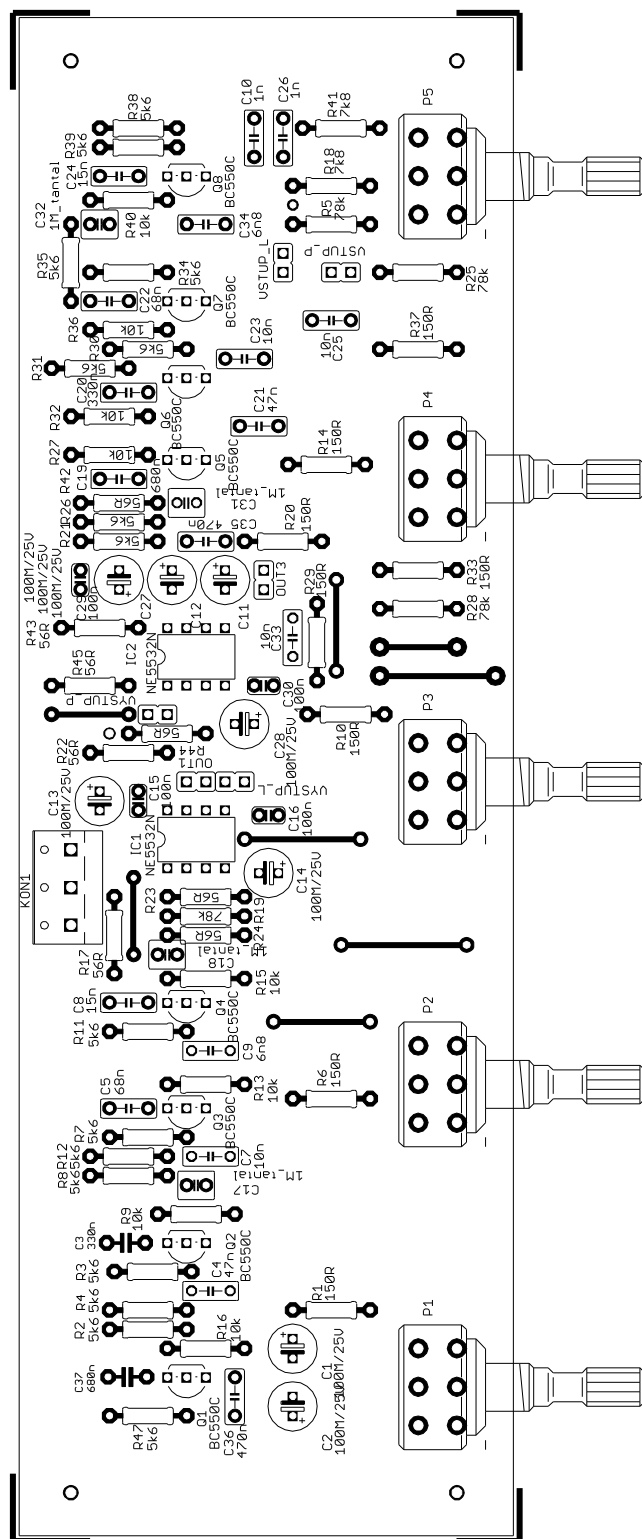
Obrázek 5.6: rozložení součástek omezovače amplitudy, strana TOP, 69 x 75 mm, M 1:1



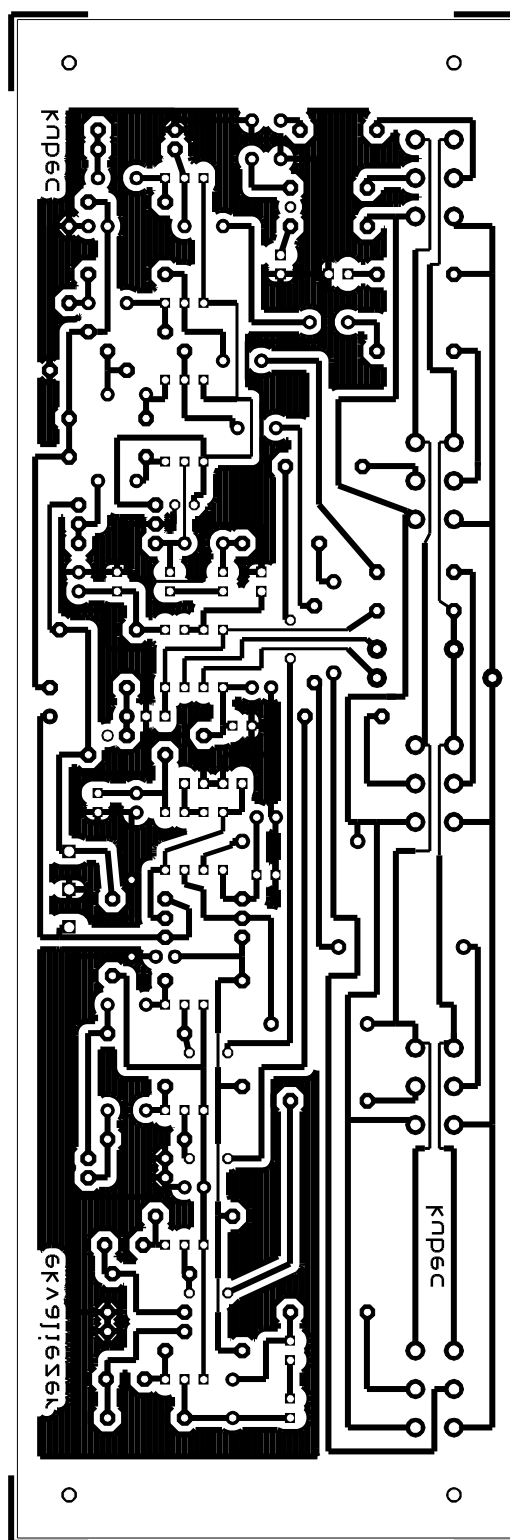
Obrázek 5.7: DPS omezovače amplitudy, strana BOTTOM, 69 x 75 mm, M 1:1

Tabulka 5.6: Seznam součástek omezovače amplitudy

Počet	Hodnota	Pouzdro	součástka
6		1N4007	D1, D3, D6, D7, D8, D9
1		JP2E	NAP
2		LED_5	D5, D10
2	1M/25V	220M/25V	C6, C8
2	1k	PT-10_V-LEZ	TRIM_KOMP, TRIM_KOMP1
2	1k	R-10	R9, R17
2	3k3	R-10	R10, R18
2	10M/25V	33M/100V	C2, C4
2	10M/25V	47M/25V	C21, C22
6	10k	R-10	R4, R6, R7, R12, R14, R15
2	10n	C-EU025-024X044	C1, C3
2	100k	R-10	R2, R11
2	100n	C-5	C18, C20
2	100n	C-EU025-024X044	C5, C7
2	180k	R-10	R8, R16
2	470R	R-10	R5, R13
2	680k	R-10	R1, R3
2	BC548A	BC548A	Q1, Q2
2	MCS08	MCS08	IN, IN1
2	NE555	NE555	IC1, IC2
1	TL062P	TL062P	IC8
2	predni_panel	LED_5	D2, D4



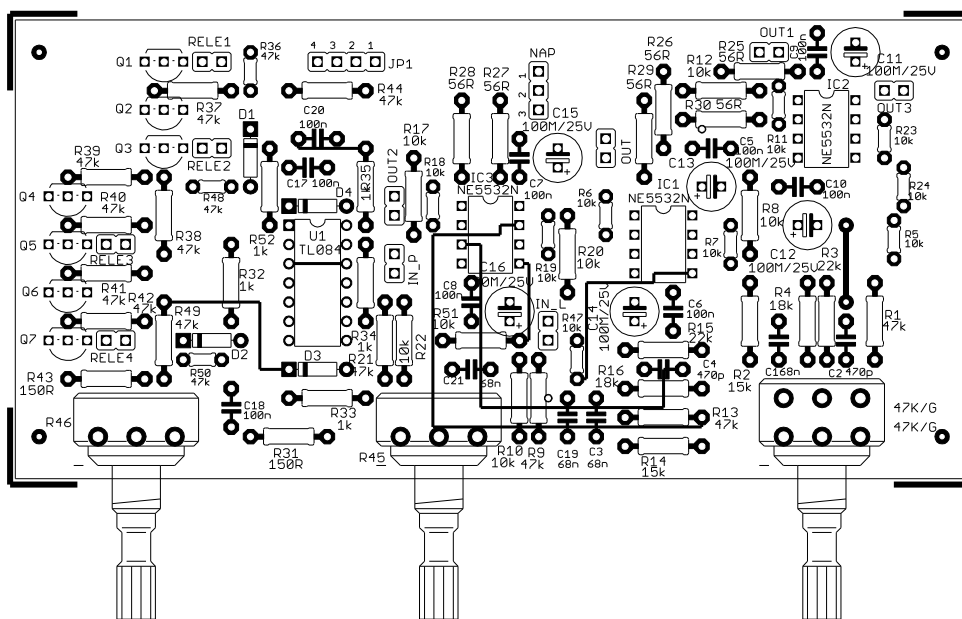
Obrázek 5.8: Osazovací plán ekvalizéru, strana TOP, 201 x 65 mm, M 1:1



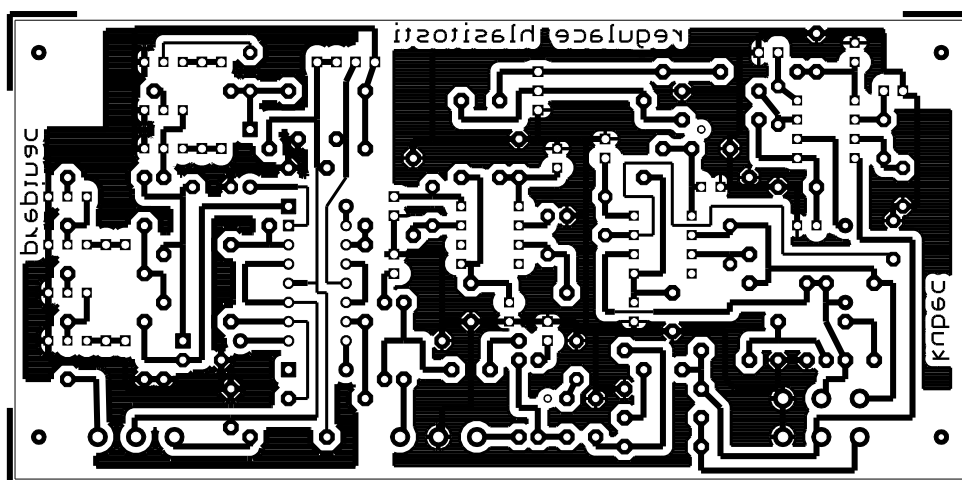
Obrázek 5.9: DPS ekvalizéru, strana BOTTOM, 201x 65 mm, M 1:1

Tabulka 5.7: Seznam součástek ekvalizéru

počet	hodnota	pouzdro	součástka
6		JP1E	OUT1, OUT3, VSTUP_L, VSTUP_P, VYSTUP_L, VYSTUP_P
5		PC1622	P1, P2, P3, P4, P5
1		W237-103	KON1
4	1M_tantal	C-EU025-040X050	C17, C18, C31, C32
2	1n	C-EU050-025X075	C10, C26
16	5k6	R-10	R2, R3, R4, R7, R8, R11, R12, R21, R26, R30, R31, R34, R35, R38, R39, R47
2	6n8	C-EU050-025X075	C9, C34
2	7k8	R-10	R18, R41
8	10k	R-10	R9, R13, R15, R16, R27, R32, R36, R40
4	10n	C-EU050-025X075	C7, C23, C25, C33
2	15n	C-EU050-025X075	C8, C24
2	47n	C-EU050-025X075	C4, C21
8	56R	R-10	R17, R22, R23, R24, R42, R43, R44, R45
2	68n	C-EU050-025X075	C5, C22
4	78k	R-10	R5, R19, R25, R28
8	100M/25V	100M/25V	C1, C2, C11, C12, C13, C14, C27, C28
4	100n	C-EU025-024X044	C15, C16, C29, C30
8	150R	R-10	R1, R6, R10, R14, R20, R29, R33, R37
1	330n	C-5	C3
1	330n	C-EU050-025X075	C20
2	470n	C-EU050-025X075	C35, C36
1	680n	C-5	C37
1	680n	C-EU050-025X075	C19
8	BC550C	BC550C	Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8
2	NE5532N	NE5532N	IC1, IC2



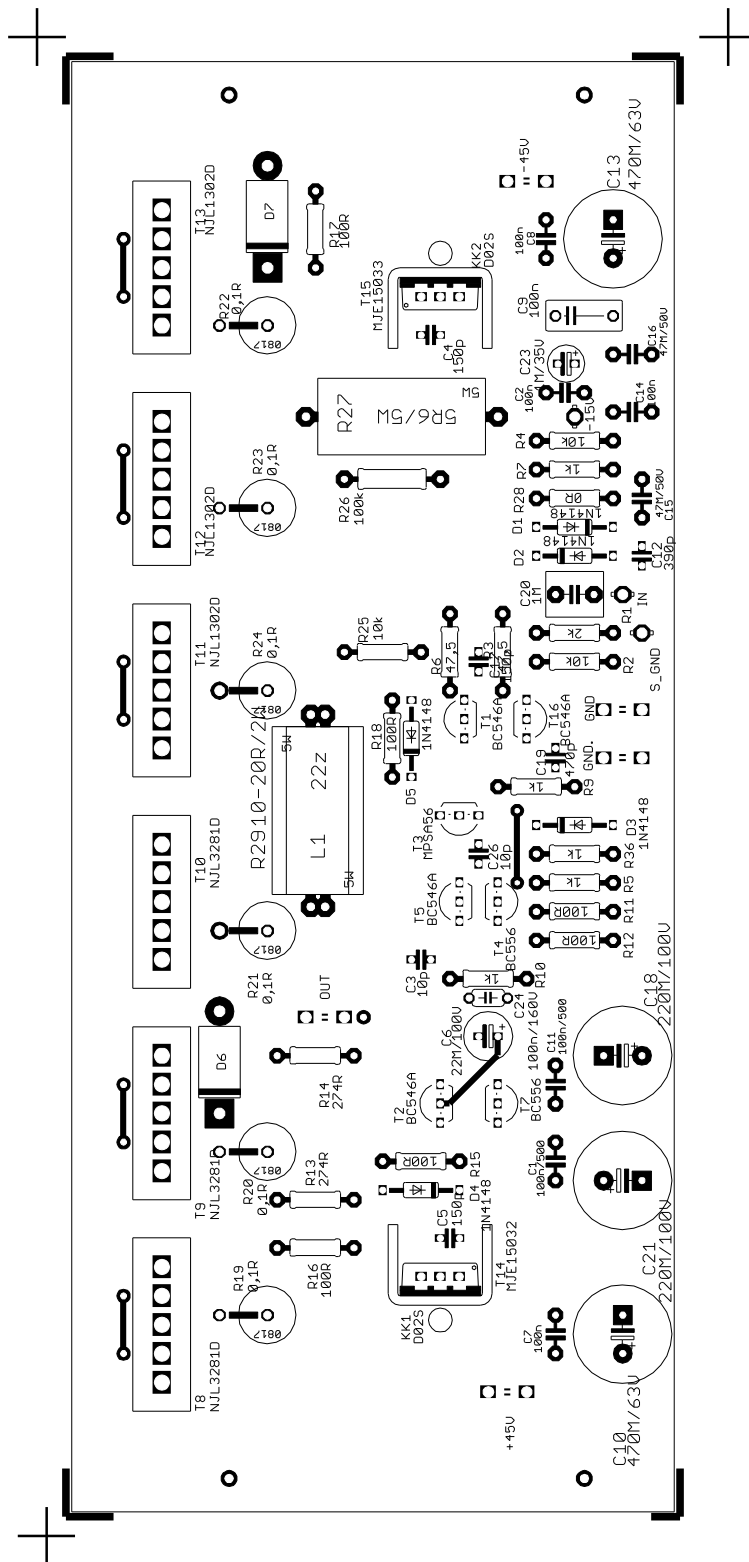
Obrázek 5.10: Osazovací plán fyziologické regulace hlasitosti a potenciometrického přepínače vstupů, strana TOP, 126 x 61 mm, M 1:1



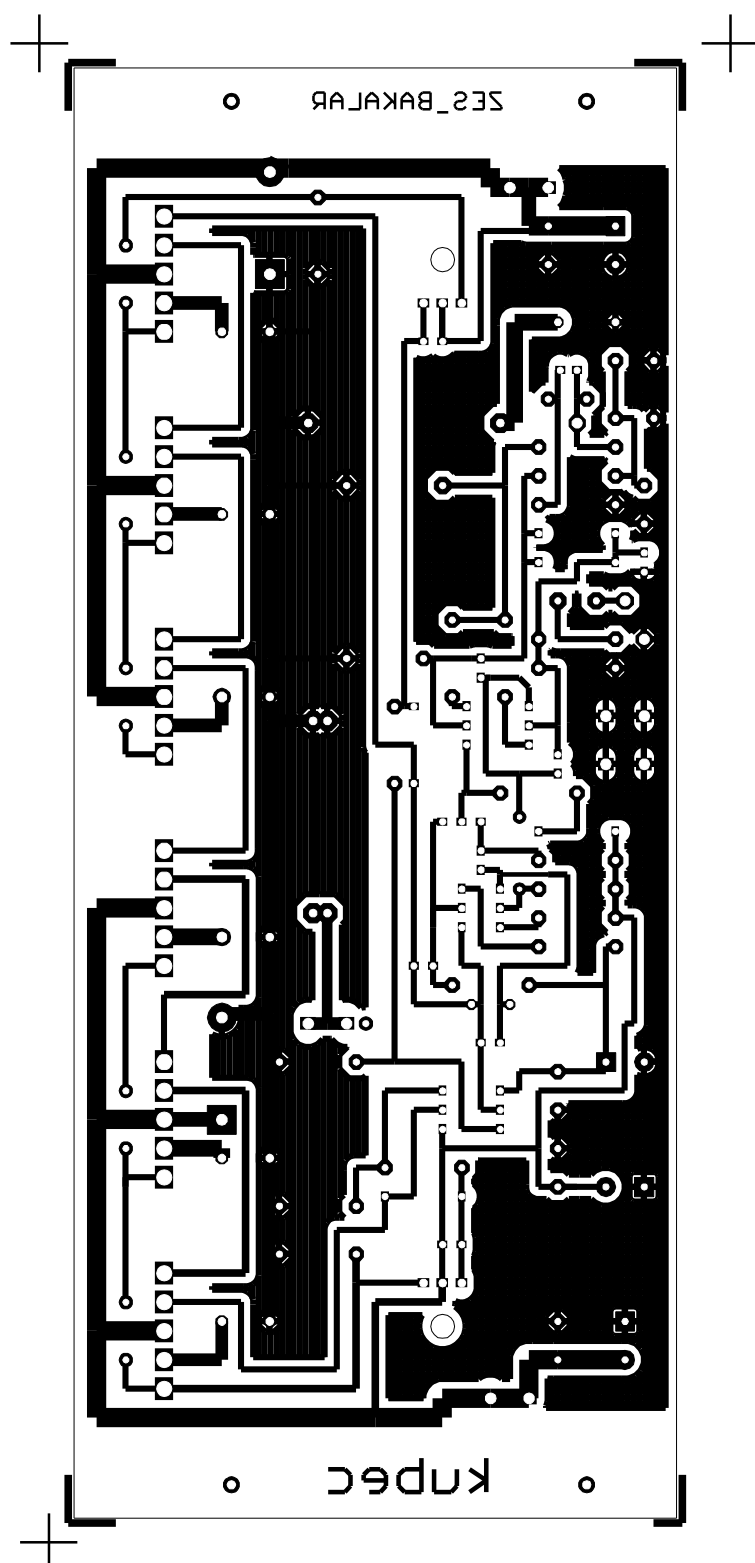
Obrázek 5.11: DPS fyziologické regulace hlasitosti a potenciometrického přepínače vstupů, strana BOTTOM, 126 x 61 mm, M 1:1

5.8: Seznam součástek fyziologické regulace hlasitosti a přepínače vstupů

počet	hodnota	pouzdro	součástka
4		1N4148	D1, D2, D3, D4
3		BC548	Q2, Q4, Q6
4		BC548B	Q1, Q3, Q5, Q7
4		JP1E	RELE1, RELE2, RELE3, RELE4
6		JP1Q	IN_L, IN_P, OUT, OUT1, OUT2, OUT3
1		JP2E	NAP
1		JP4E	JP1
2		PC1621	R45, R46
5	1k	R-10	R32, R33, R34, R35, R52
9	10k	R-5	R5, R6, R7, R11, R18, R19, R23, R24, R47
7	10k	R-10	R8, R10, R12, R17, R20, R22, R51
2	15k	R-10	R2, R14
2	18k	R-10	R4, R16
2	22k	R-10	R3, R15
1	47K/G	PC1622	47K/G
3	47k	R-5	R36, R48, R50
12	47k	R-10	R1, R9, R13, R21, R37, R38, R39, R40, R41, R42, R44, R49
6	56R	R-10	R25, R26, R27, R28, R29, R30
4	68n	C-5	C1, C3, C19, C21
6	100M/25V	100M/25V	C11, C12, C13, C14, C15, C16
9	100n	C-5	C5, C6, C7, C8, C9, C10, C17, C18, C20
2	150R	R-10	R31, R43
2	470p	C-5	C2, C4
3	NE5532N	NE5532N	IC1, IC2, IC3
1	TL084	TL084	U1



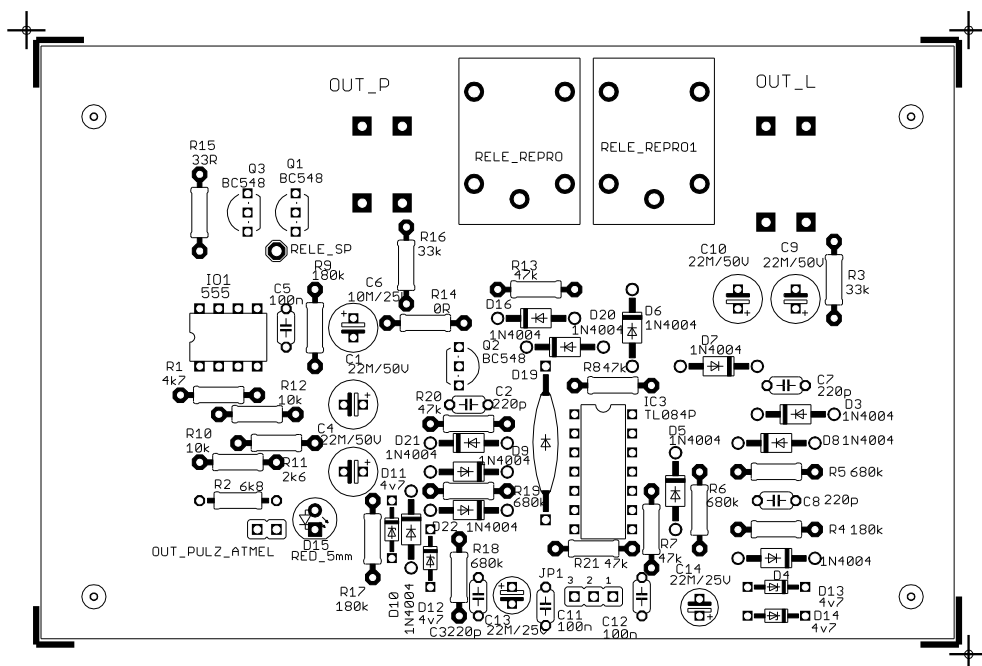
Obrázek 5.12: Rozmístění součástek koncového stupně zesilovače, strana TOP, 78 x 192 mm, M 1:1



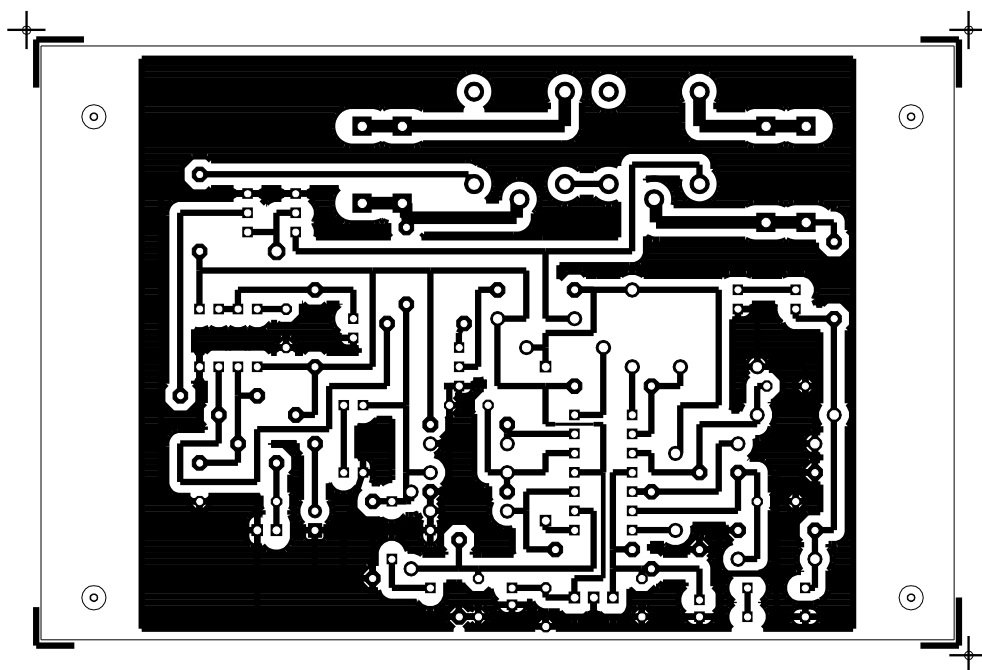
Obrázek 5.13: DPS koncového stupně zesilovače, strana BOTTOM,
78 x 192 mm, M 1:1

Tabulka 5.9: Seznam součástek koncového stupně zesilovače

Počet	Hodnota	Pouzdro	součástka
2		BY228	D6, D7
5		ST4,8	+45V, -45V, GND, GND., OUT
6	0,1R	R-EU_0817/7V	R19, R20, R21, R22, R23, R24
1	0R	R-10	R28
1	1M	680N-K/63V	C20
1	1M/35V	22M/35V	C23
5	1N4148	1N4148	D1, D2, D3, D4, D5
5	1k	R-10	R5, R7, R9, R10, R36
1	2k	R-10	R1
1	5R6/5W	W5_6R8	R27
1	10-20R/2W	W5_6R8	R29
3	10k	R-10	R2, R4, R25
2	10p	C-2,5	C3, C26
1	22M/100V	22M/100V	C6
1	22z	W5_6R8	L1
2	47,5	R-10	R3, R6
2	47M/50V	C-5	C15, C16
6	100R	R-10	R11, R12, R15, R16, R17, R18
1	100k	R-12,7	R26
4	100n	C-5	C2, C7, C8, C14
1	100n	C-EU075-042X103	C9
1	100n/160V	C-EU050-024X044	C24
2	100n/500	C-5	C1, C11
3	150p	C-2,5	C4, C5, C17
2	220M/100V	220M/100V	C18, C21
2	274R	R-10	R13, R14
1	390p	C-2,5	C12
2	470M/63V	470M/63V	C10, C13
1	470p	C-2,5	C19
4	BC546A	BC546A	T1, T2, T5, T16
2	BC556	BC556	T4, T7
2	D02S	D02S	KK1, KK2
3	LSP13	LSP13	-15V, IN, S_GND
1	MJE15032	MJE3055	T14
1	MJE15033	MJE2955	T15
1	MPSA56	MPSA56	T3
3	NJL1302D	NJL1302D	T11, T12, T13
3	NJL3281D	NJL3281D	T8, T9, T10



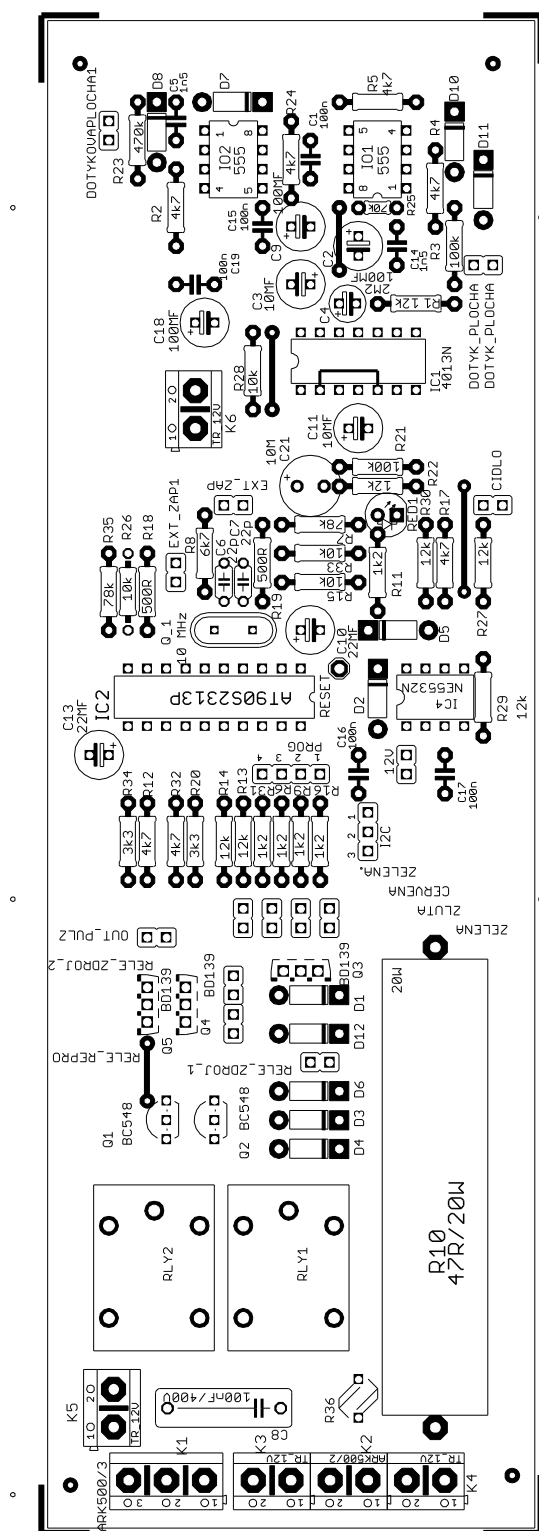
Obrázek 5.14: Osazovací plán modulu ochrany reproduktorů, strana TOP, 121 x 78,5 mm, M 1:1



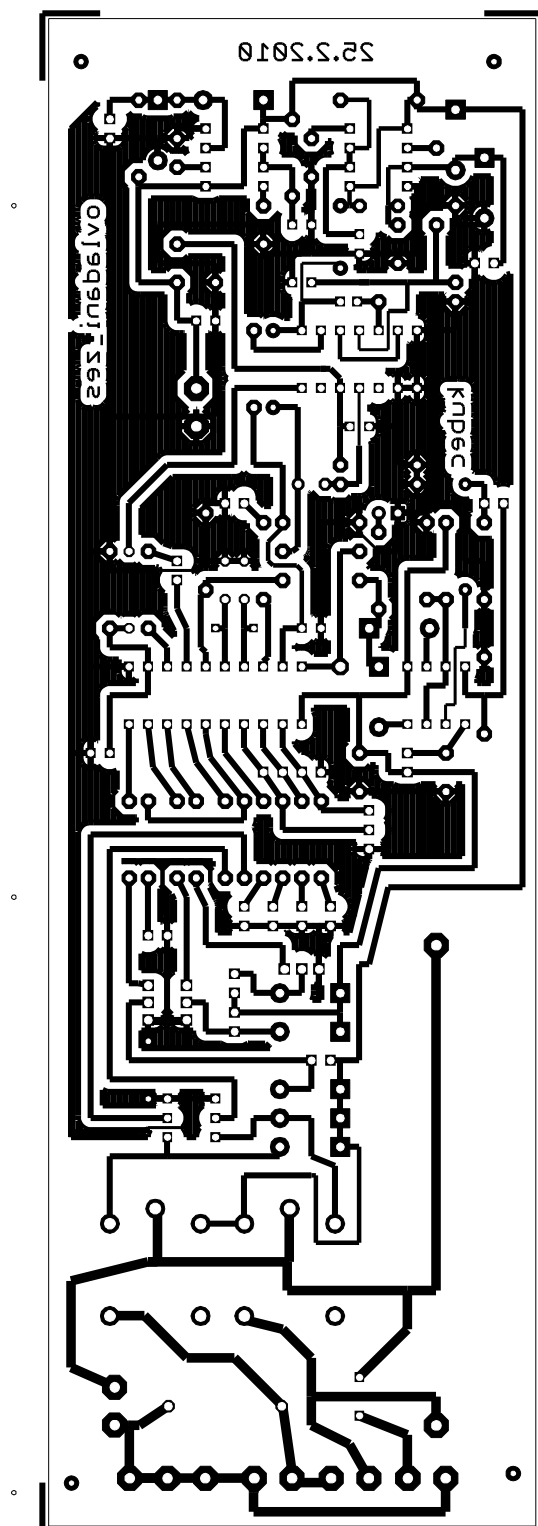
Obrázek 5.15: DPS ochrany reproduktorů, strana BOTTOM, 121 x 78,5 mm, M 1:1

Tabulka 5.10: Seznam použitých součástek modulu ochrany reproduktorů

Počet	Hodnota	Pouzdro	součástka
1		DIODE-SOD61E	D19
1		JP1E	OUT_PULZ_ATMEL
1		JP2E	JP1
2		RELEG5LE	RELE_REPRO, RELE_REPRO1
1	0R	R-10	R14
12	1N4004	1N4004	D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D16, D20, D21, D22
1	2k6	R-10	R11
1	4k7	R-10	R1
4	4v7	ZENER-DIODEDO34-7	D11, D12, D13, D14
1	6k8	R-EU_0207/10	R2
1	10M/25V	22M/100V	C6
2	10k	R-10	R10, R12
2	22M/25V	10M/25V	C13, C14
4	22M/50V	22M/100V	C1, C4, C9, C10
1	33R	R-10	R15
2	33k	R-10	R3, R16
5	47k	R-10	R7, R8, R13, R20, R21
3	100n	C-EU050-024X044	C5, C11, C12
3	180k	R-10	R4, R9, R17
4	220p	C-EU050-024X044	C2, C3, C7, C8
1	555	555	IO1
4	680k	R-10	R5, R6, R18, R19
3	BC548	BC548	Q1, Q2, Q3
1	MCS08	MCS08	RELE_SP
4	PIN2F061.040	PIN2F061.040	IN_L, IN_P, OUT_L, OUT_P
1	RED_5mm	LED_5	D15
1	TL084P	TL084P	IC3



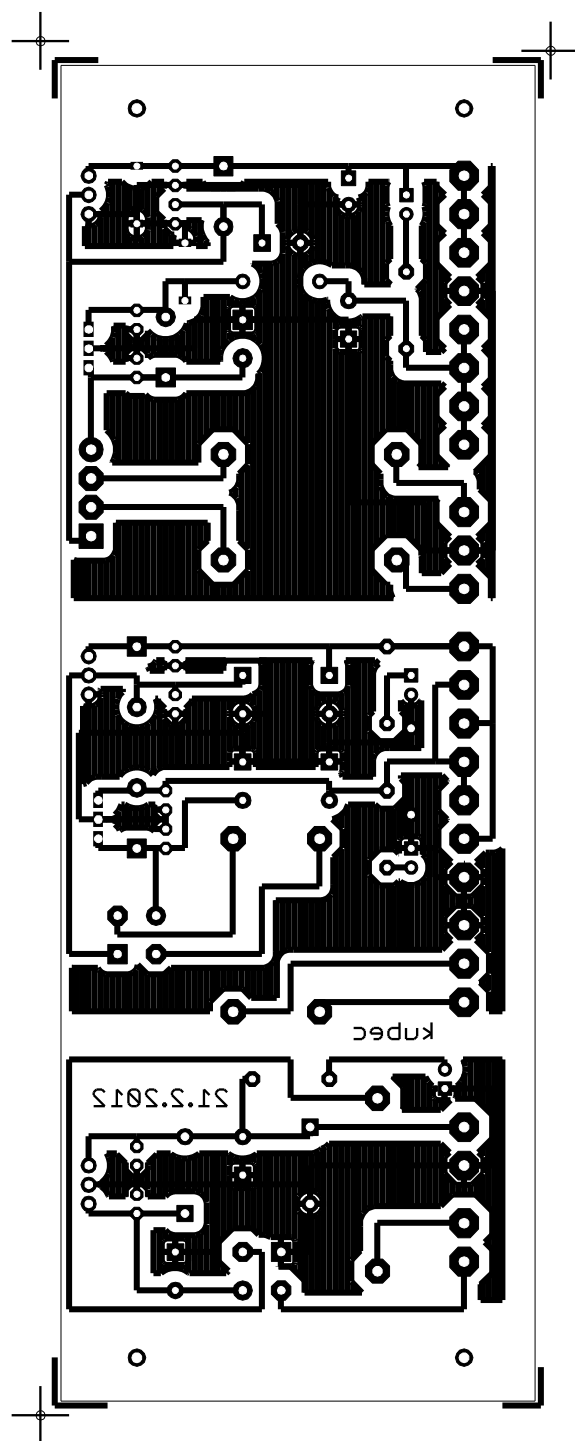
Obrázek 5.16: Rozmístění součástek modulu řízení zesilovače, strana TOP, 200 x 65 mm, M 1:1



Obrázek 5.17: DPS modulu řízení zesilovače, strana BOTTOM, 200 x 65 mm, M 1:1

Tabulka 5.11: Seznam součástek modulu řízení zesilovače

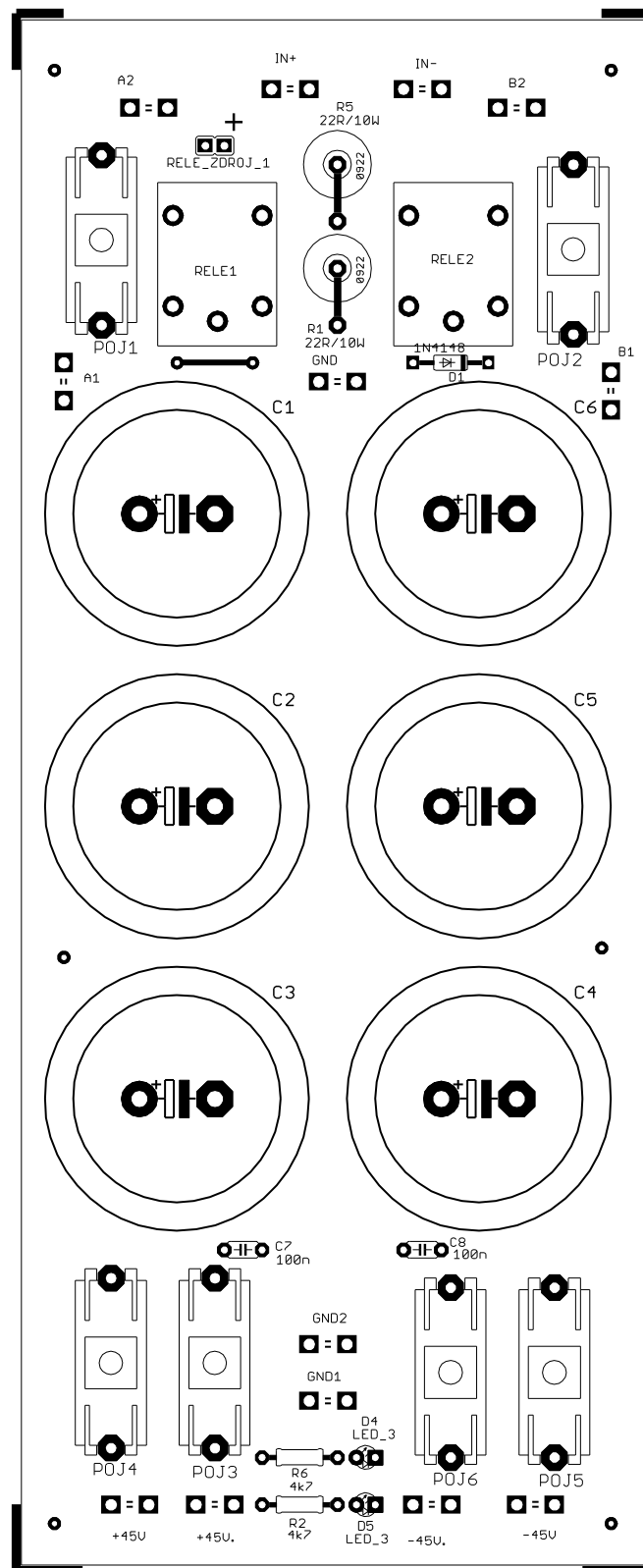
Počet	Hodnota	Pouzdro	součástka
11		1N4007	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D10, D11, D12
1		B57164	R36
4		JP1E	12V, CIDLO, EXT_ZAP, EXT_ZAP1
9		JP1Q	CERVENA, DOTYKOVAPLOCHA1, OUT_PULZ, RELE_REPRO, RELE_ZDROJ_1, RELE_ZDROJ_2, ZELENÁ, ZELENÁ., ZLUTÁ
1		JP2E	I2C
1		JP4E	PROG
1		LED_5	RED1
2		RELEG5LE	RLY1, RLY2
5	1k2	R-10	R6, R9, R11, R16, R31
2	1n5	C-5	C5, C14
1	2M2	2M2/50V	C4
2	3k3	R-10	R20, R34
7	4k7	R-10	R2, R4, R5, R12, R17, R24, R32
1	6k7	R-10	R8
1	10 MHz	XTAL/S	Q_1
1	10M	CPOL-EUE3.5-8	C21
2	10MF	100M/16V	C3, C11
3	10k	R-10	R15, R28, R33
1	10k	R-EU_0207/10	R26
7	12k	R-10	R1, R13, R14, R22, R27, R29, R30
2	22MF	100M/16V	C10, C13
2	22p	C-EU050-024X044	C6, C7
1	47R/20W	W20_6R8	R10
2	78k	R-10	R7, R35
3	100MF	100M/16V	C2, C9, C18
2	100k	R-10	R3, R21
5	100n	C-5	C1, C15, C16, C17, C19
1	100nF/400V	C-EU150-054X183	C8
1	470k	R-5	R25
1	470k	R-10	R23
2	500R	R-10	R18, R19
2	555	555	IO1, IO2
1	4013N	4013N	IC1
1	ARK500/2	ARK500/2	K2
1	ARK500/3	ARK500/3	K1
1	AT90S2313P	AT90S2313P	IC2
2	BC548	BC548	Q1, Q2
3	BD139	BD139	Q3, Q4, Q5
1	DOTYK_PLOCHA	JP1Q	DOTYK_PLOCHA
1	MCS08	MCS08	RESET
1	NE5532N	NE5532N	IC4
4	TR_12V	ARK500/2	K3, K4, K5, K6



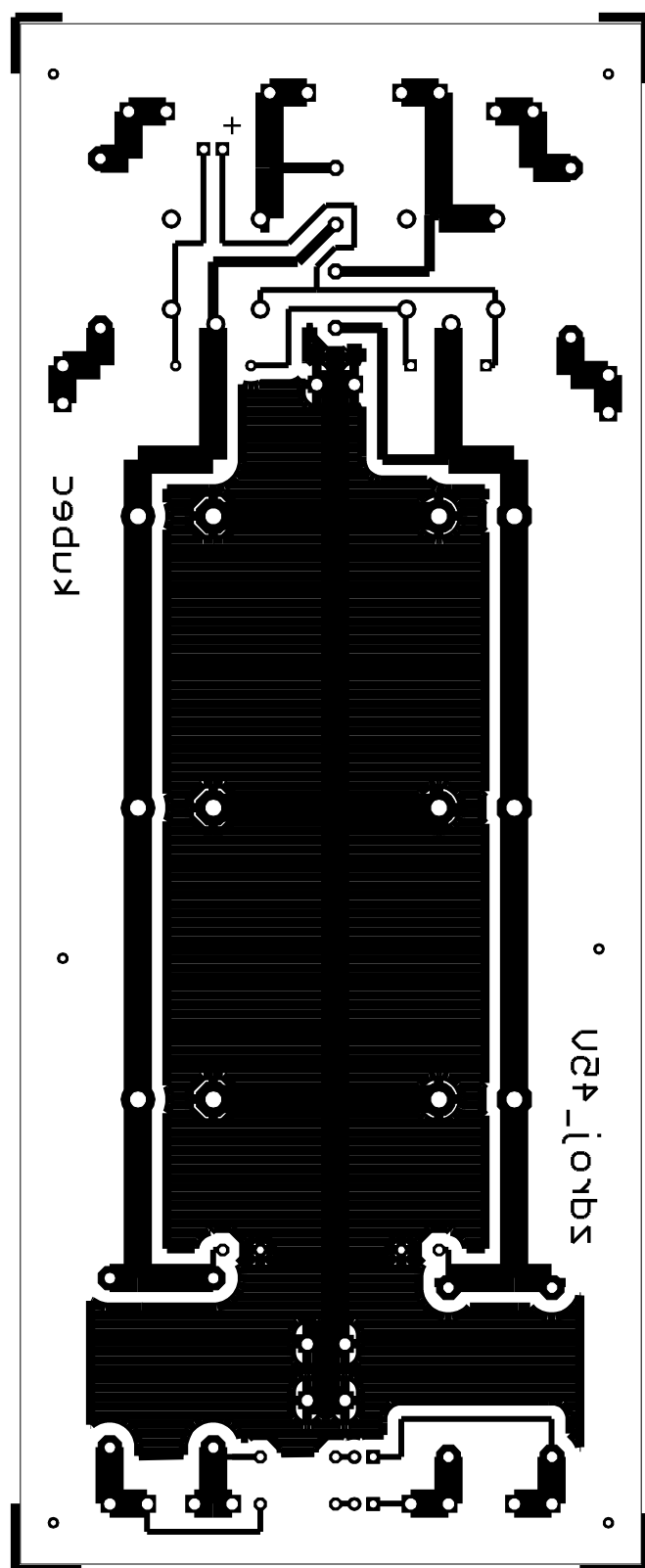
Obrázek 5.19: DPS zdroje se stabilizátory, strana BOTTOM, 177 x 63 mm, M 1:1

Tabulka 5.12: Seznam použitých součástek zdroje se stabilizátory

Počet	Hodnota	Pouzdro	součástka
4		1N4148	D3, D9, D11, D13
1		ARK500/2	TR5V
1		LED_5	D8
5		PO_KS20-01	POJ1, POJ2, POJ3, POJ4, POJ5
1	12	ARK500/4	K1
2	+15V	ARK500/3	TR12V, TR15V
1	-12	ARK500/4	K2
2	1N4007_10	1N4007_10	D6, D7
1	1k	R-10	R2
2	2k7	R-10	R3, R4
1	4k7	R-10	R1
1	5V	ARK500/2	K7
10	100n	C-EU025-024X044	C5, C6, C8, C9, C11, C15, C16, C17, C18, C31
1	220M/25V	220M/16V	C12
2	220M/25V	470M/25V	C4, C7
3	470M/25V	470M/25V	C3, C21, C22
1	470M/35V	470M/25V	C2
2	470M/35V	470M/35V	C20, C25
1	1000M/25V	1000M/25V	C1
1	7805	7805	U1
1	7812	7812TV	IC1
1	7815	7812TV	IC4
1	7912	7912	U2
1	7915	7915	U3
1	A15	ARK500/2	K5
1	B15	ARK500/3	K8
2	B250C1500	B250C1500	M2, M3
1	B250C1500F	B250C1500F	M1
2	BAS15	BAS15	D2, D15
1	C15	ARK500/2	K6
3	LED_3	LED_3	D1, D4, D5



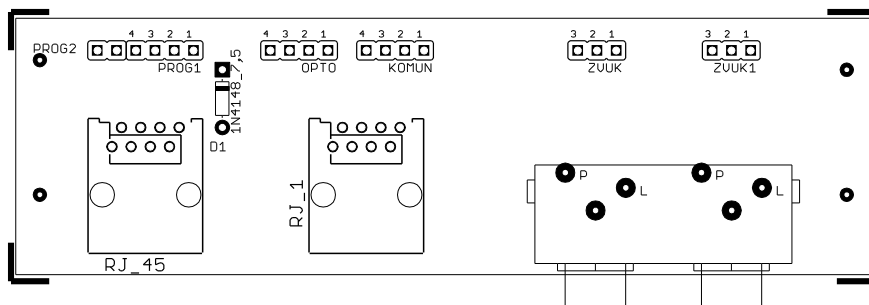
Obrázek 5.20: Osazovací plán zdroje 45V, strana TOP, 84 x 208 mm, M 1:1



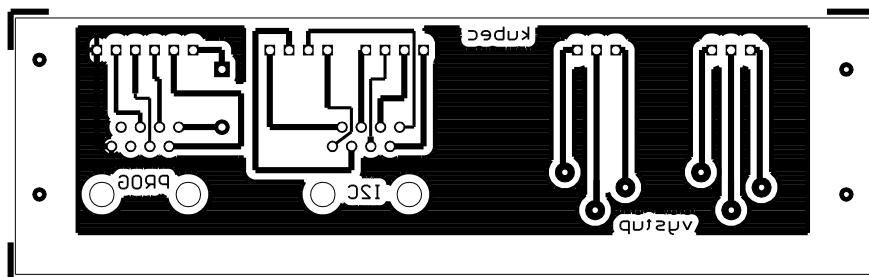
Obrázek 5.21: DPS zdroje 45V, strana BOTTOM, 84 x 208 mm, M 1:1

Tabulka 5.13: Seznam součástek zdroje pro koncový stupeň zesilovače

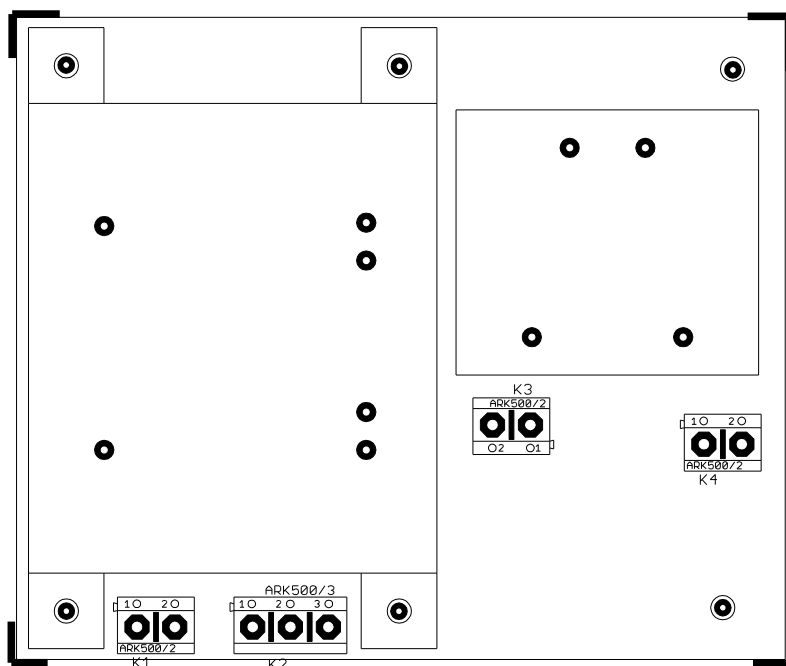
Počet	Hodnota	Pouzdro	součástka
6		CPOL-EUE10-35	C1, C2, C3, C4, C5, C6
1		JP1Q	RELE_ZDROJ_1
6		PO_KS20-01	POJ1, POJ2, POJ3, POJ4, POJ5, POJ6
2		RELEG5LE	RELE1, RELE2
13		ST4,8	+45V, +45V., -45V, -45V., A1, A2, B1, B2, GND, GND1, GND2, IN+, IN-
1	1N4148	1N4148	D1
2	4k7	R-EU_0207/10	R2, R6
2	22R/10W	R-EU_0922V	R1, R5
2	100n	C-EU050-024X044	C7, C8
2	LED_3	LED_3	D4, D5



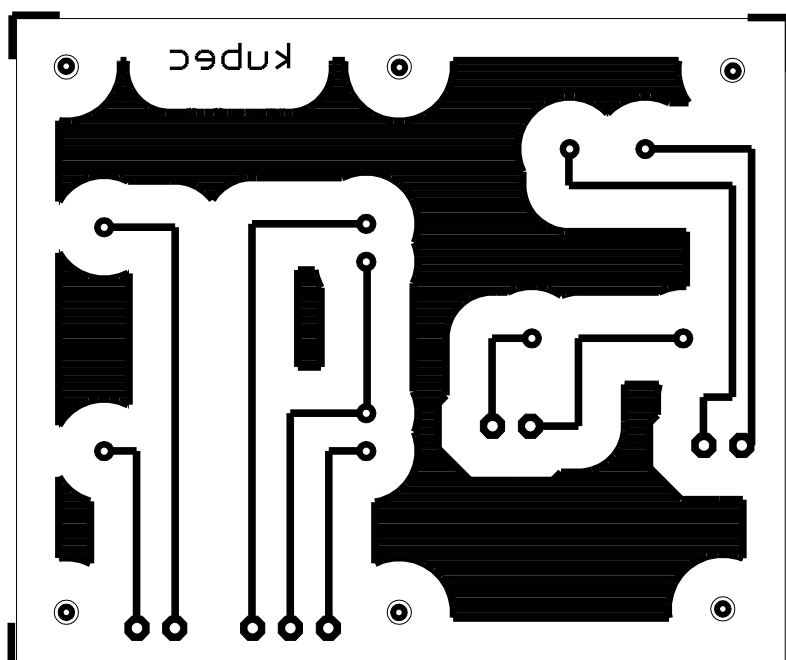
Obrázek 5.22: Osazovací plán modulu vstupů, strana TOP, 113 x 34 mm, M 1:1



Obrázek 5.23: DPS modulu vstupů, strana BOTTOM, 113x 34 mm, M 1:1



Obrázek 5.24: Osazovací plán modulu transformátorů, strana TOP, 102 x 85 mm, M 1:1



Obrázek 5.25: DPS modulu transformátorů, strana BOTTOM, 102 x 85 mm, M 1:1

5.3 Protokol o měření

Naměřené a zpracované hodnoty pro předzesilovač:

Měření vstupního odporu

Levý kanál: $R_{\text{vst}} = 51 \text{ k}\Omega$

Pravý kanál: $R_{\text{vst}} = 51 \text{ k}\Omega$

Měřeno pro $U_{\text{vst}} = 200 \text{ mV}$, při $f_{\text{vst}} = 1 \text{ kHz}$

Měření THD+N

THD+N = 0,025 %

Zkreslení generátoru 0,025 %

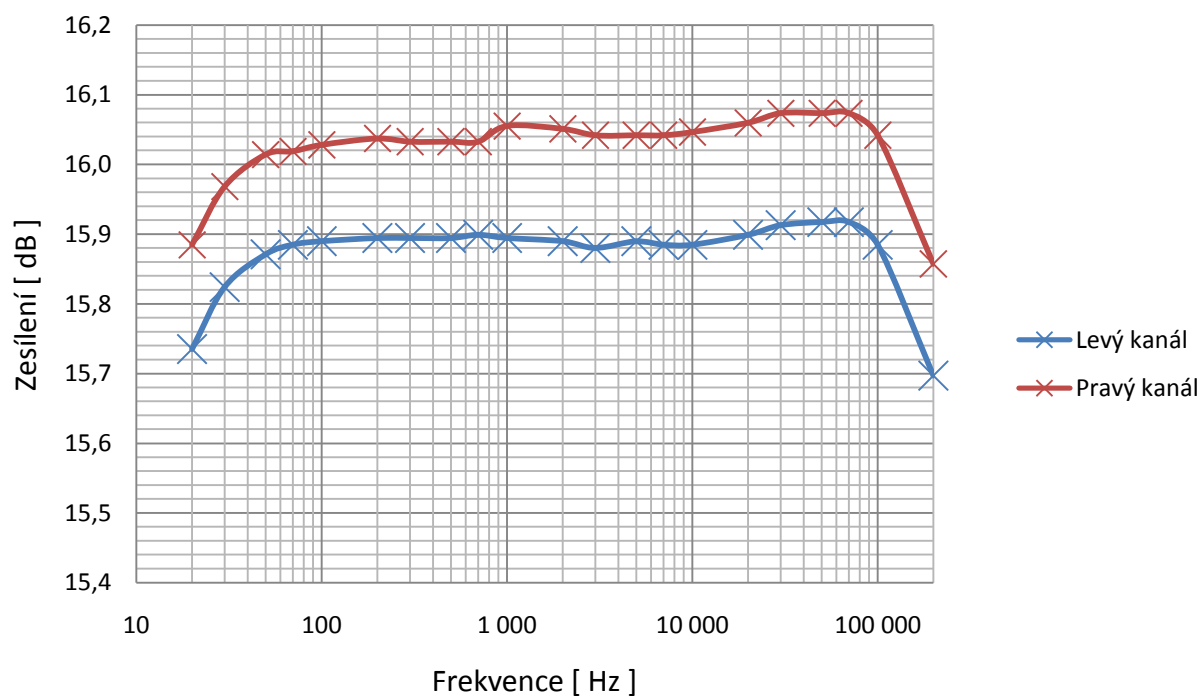
Měření frekvenční modulové charakteristiky

$$U_{\text{vst}} = 300 \text{ mV}$$

5.14: Změřené hodnoty frekvenční modulové charakteristiky

frekvence [Hz]	$U_{\text{vst}} \text{ levý}$ kanál [V]	Zesílení levý kanál [dB]	$U_{\text{vst}} \text{ pravý}$ kanál [V]	Zesílení pravý kanál [dB]
20	1,836	15,74	1,868	15,89
30	1,855	15,82	1,886	15,97
50	1,865	15,87	1,896	16,01
70	1,868	15,89	1,897	16,02
100	1,869	15,89	1,899	16,03
200	1,870	15,89	1,901	16,04
300	1,870	15,89	1,900	16,03
500	1,870	15,89	1,900	16,03
700	1,871	15,90	1,900	16,03
1000	1,870	15,89	1,905	16,06
2000	1,869	15,89	1,904	16,05
3000	1,867	15,88	1,902	16,04
5000	1,869	15,89	1,902	16,04
7000	1,868	15,89	1,902	16,04
10000	1,868	15,89	1,903	16,05
20000	1,871	15,90	1,906	16,06
30000	1,874	15,91	1,909	16,07
50000	1,875	15,92	1,909	16,07
70000	1,875	15,92	1,909	16,07
100000	1,868	15,89	1,902	16,04
200000	1,828	15,70	1,862	15,86

Frekvenční modulová charakteristika předzesilovače



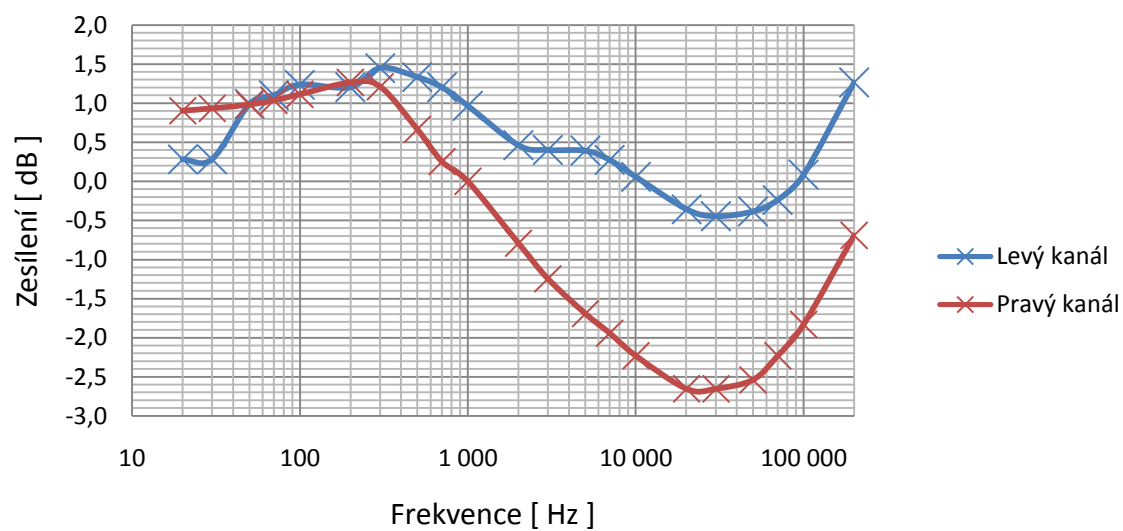
Měření parametrů ekvalizéru

$$U_{\text{vst}} = 300 \text{ mV}$$

Tabulka 5.15: Změřené hodnoty frekvenční modulové charakteristiky

frekvence [Hz]	$U_{\text{výst}}$ levý kanál [mV]	Zesílení levý kanál [dB]	$U_{\text{výst}}$ pravý kanál [mV]	Zesílení pravý kanál [dB]
20	310	0,28	333	0,91
30	310	0,28	334	0,93
50	336	0,99	336	0,98
70	341	1,10	338	1,04
100	346	1,24	341	1,11
200	345	1,20	347	1,26
300	355	1,45	345	1,21
500	350	1,34	324	0,67
700	345	1,20	309	0,26
1000	335	0,97	300	0,00
2000	316	0,46	274	-0,79
3000	314	0,40	260	-1,24
5000	314	0,39	247	-1,69
7000	310	0,27	240	-1,94
10000	302	0,06	232	-2,23
20000	288	-0,35	221	-2,65
30000	285	-0,45	221	-2,65
50000	287	-0,38	224	-2,54
70000	292	-0,23	232	-2,23
100000	303	0,09	243	-1,83
200000	347	1,26	277	-0,69

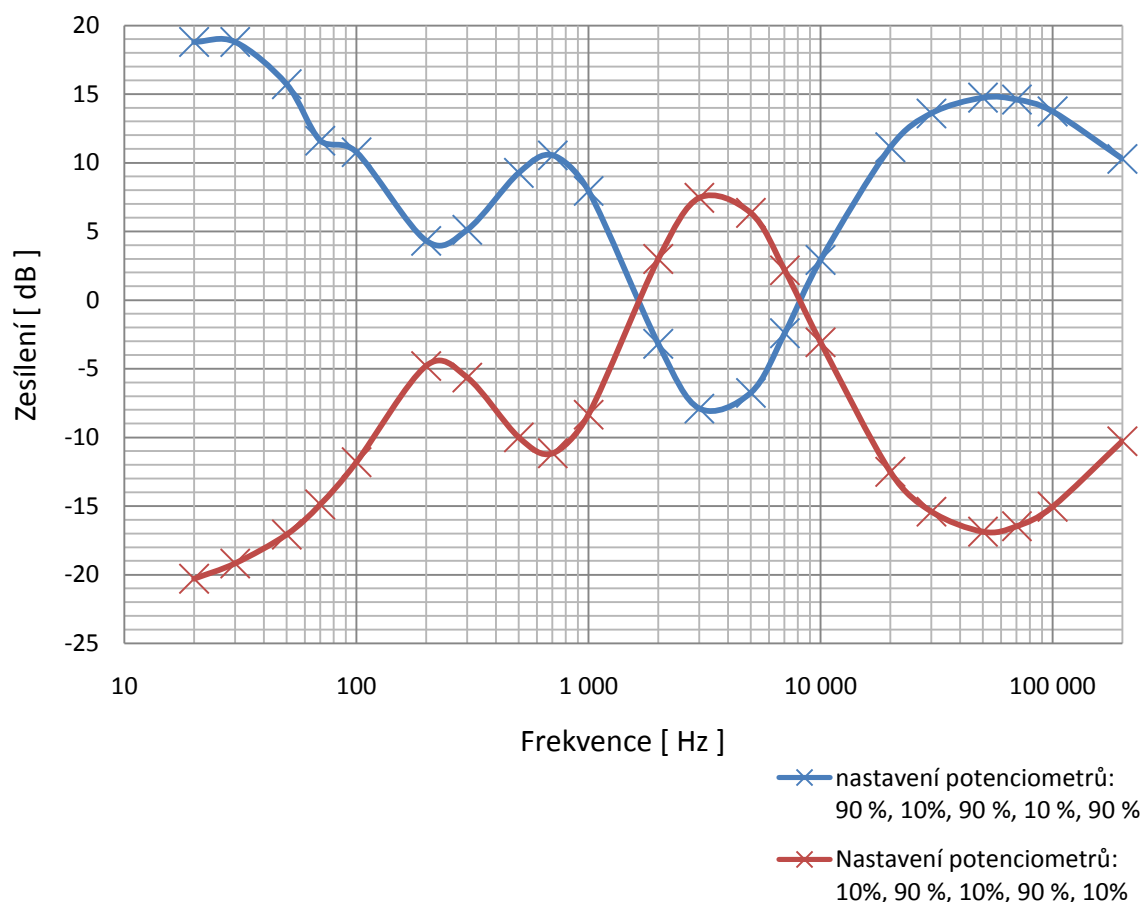
Frekvenční modulová charakteristika ekvalizéru, vyvážené nastavení



Tabulka 5.16: Změřené hodnoty frekvenční modulové charakteristiky, nevyvážené nastavení potenciometrů

frekvence [Hz]	Nastavení potenciometrů: 90 %, 10%, 90 %, 10 %, 90 %		Nastavení potenciometrů: 10%, 90 %, 10%, 90 %, 10%	
	$U_{\text{výst}} \text{ levý kanál [mV]}$	Zesílení levý kanál [dB]	$U_{\text{výst}} \text{ levý kanál [mV]}$	Zesílení levý kanál [dB]
20	2611	18,8	29	-20,3
30	2611	18,8	33	-19,2
50	1834	15,7	42	-17,1
70	1144	11,6	54	-14,9
100	1039	10,8	77	-11,8
200	494	4,3	173	-4,8
300	540	5,1	157	-5,6
500	872	9,3	95	-10,0
700	1011	10,6	83	-11,2
1000	751	8,0	115	-8,3
2000	208	-3,2	423	3,0
3000	121	-7,9	707	7,4
5000	138	-6,7	623	6,3
7000	227	-2,4	386	2,2
10000	420	2,9	211	-3,1
20000	1080	11,1	71	-12,5
30000	1438	13,6	51	-15,4
50000	1638	14,7	43	-16,9
70000	1610	14,6	45	-16,5
100000	1458	13,7	53	-15,1
200000	982	10,3	92	-10,3

Frekvenční modulová charakteristika ekvalizéru, nevyvážené nastavení



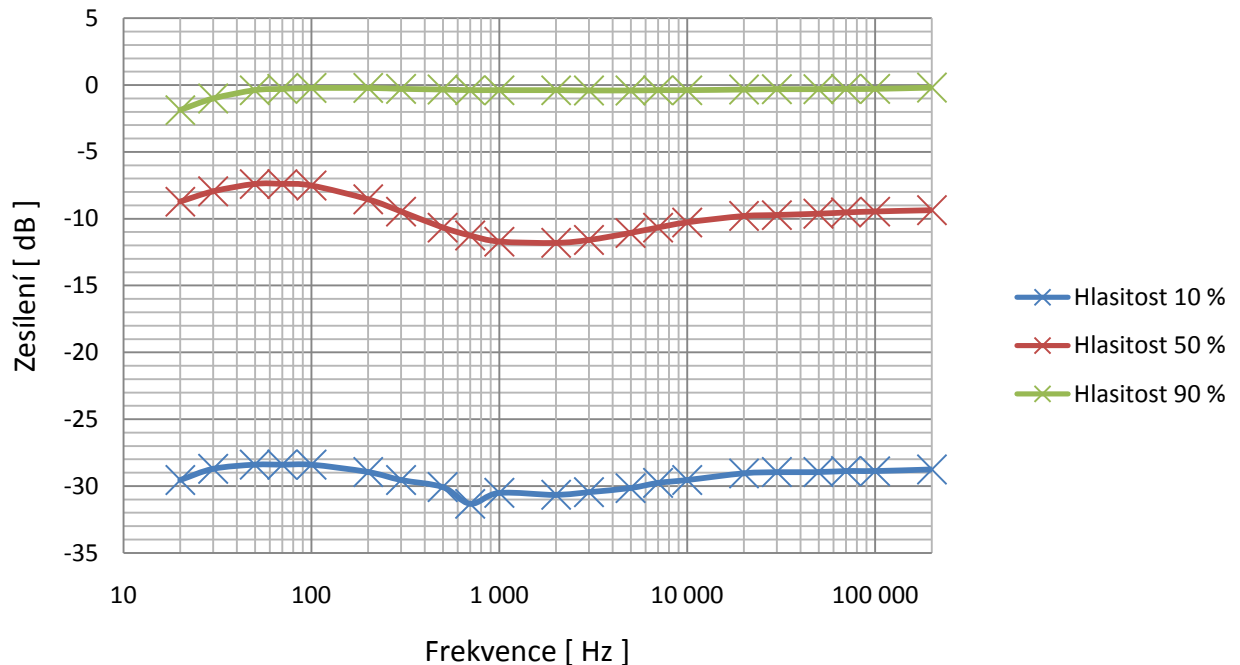
Měření parametrů fyziologické regulace hlasitosti

$$U_{\text{vst}} = 300 \text{ mV}$$

Tabulka 5.17: Změřené hodnoty frekvenční modulové charakteristiky fyziologické regulace hlasitosti

frekvence [Hz]	Nastavení hlasitosti					
	10%		50%		90%	
	$U_{\text{výst}}$ levý kanál [mV]	Zesílení levý kanál [dB]	$U_{\text{výst}}$ levý kanál [mV]	Zesílení levý kanál [dB]	$U_{\text{výst}}$ levý kanál [mV]	Zesílení levý kanál [dB]
20	10,0	-29,5	110	-8,7	242	-1,9
30	11,0	-28,7	120	-8,0	267	-1,0
50	11,4	-28,4	128	-7,4	287	-0,4
70	11,4	-28,4	128	-7,4	290	-0,3
100	11,4	-28,4	126	-7,5	292	-0,2
200	10,7	-29,0	112	-8,6	292	-0,2
300	10,0	-29,5	101	-9,5	290	-0,3
500	9,4	-30,1	88	-10,7	288	-0,4
700	8,2	-31,3	82	-11,3	287	-0,4
1000	9,0	-30,5	78	-11,7	287	-0,4
2000	8,8	-30,7	77	-11,8	287	-0,4
3000	9,0	-30,5	79	-11,6	286	-0,4
5000	9,3	-30,1	84	-11,1	286	-0,4
7000	9,8	-29,8	88	-10,7	287	-0,4
10000	10,0	-29,5	92	-10,3	287	-0,4
20000	10,6	-29,0	97	-9,8	288	-0,4
30000	10,7	-29,0	98	-9,7	289	-0,3
50000	10,7	-29,0	99	-9,6	289	-0,3
70000	10,8	-28,9	100	-9,5	290	-0,3
100000	10,8	-28,9	101	-9,5	290	-0,3
200000	11,0	-28,8	102	-9,4	293	-0,2

Frekvenční modulová charakteristika fyziologické regulace hlasitosti



Měření parametrů koncového stupně zesilovače

Měření vstupního odporu:

$$R_{vst} = 11 \text{ k}\Omega$$

Měřeno pro $U_{vst} = 300 \text{ mV}$, při $f_{vst} = 1 \text{ kHz}$

Měření výstupního odporu:

$$U_v = 28,97 \text{ V}$$

$$U_{v0} = 28,30 \text{ V}$$

$$R_{výst} = R_z \cdot \frac{U_{v0} - U_0}{U_0} = 4 \cdot \frac{28,97 - 28,30 \text{ [V]}}{28,30 \text{ [V]}} = 94,7 \text{ m}\Omega$$

Kde:

U_v Napětí na zátěži $R_z = 4 \text{ }\Omega$

U_{v0} Napětí bez zátěže

Měření výstupního stejnosměrného napětí

$$U_{výst} = -6,8 \text{ mV}$$

Měření rychlosti přeběhu:

$$U_{\text{výst}} = 52,5 \text{ V}$$

$$t_{10\%-90\%} = 3,08 \text{ } \mu\text{s}$$

$$SR = 17 \text{ V} / \mu\text{s}$$

$$\text{Měřeno při } f_{\text{výst}} = 1 \text{ kHz}, R_z = 4 \text{ } \Omega$$

Měření THD + N:

$$THD + N = 0,255 \%$$

$$2 \cdot f = 0,0502 \%$$

$$3 \cdot f = 0,1621 \%$$

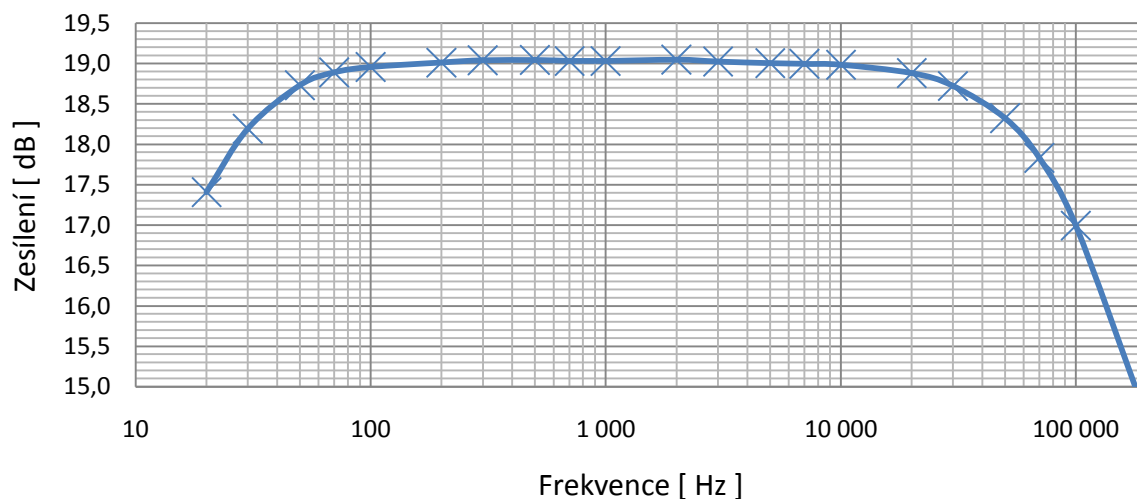
Měření frekvenční modulové charakteristiky

Tabulka 5.18: Změřené hodnoty frekvenční modulové charakteristiky koncového stupně

frekvence [Hz]	$U_{\text{výst}}$ kanál [mV]	Zesílení kanál [dB]
20	2226	17,4
30	2436	18,2
50	2592	18,7
70	2640	18,9
100	2660	19,0
200	2678	19,0
300	2686	19,0
500	2687	19,0
700	2684	19,0
1000	2684	19,0
2000	2688	19,0
3000	2681	19,0
5000	2675	19,0
7000	2672	19,0
10000	2669	19,0
20000	2637	18,9
30000	2590	18,7
50000	2473	18,3
70000	2337	17,8
100000	2123	17,0
200000	1614	14,6

$$U_{\text{vst}} = 300 \text{ mV}$$

Frekvenční modulová charakteristika koncového stupně

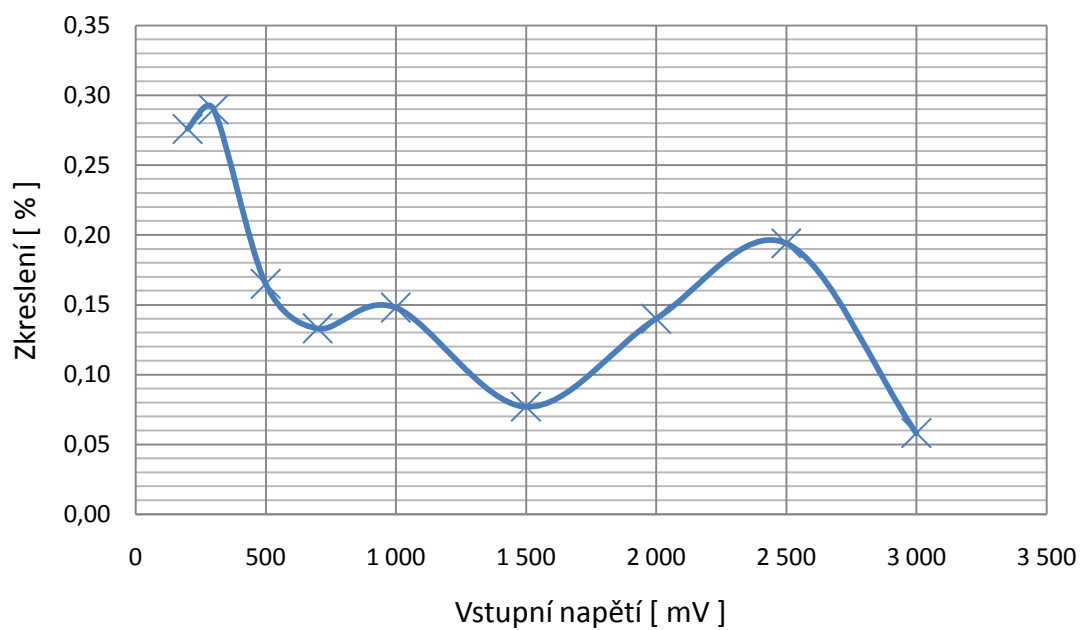


Odečtení mezní frekvence z grafu činí $f_{mez} = 140 \text{ kHz}$

Měření THD + N v závislosti na vstupním napětí

$U_{vst} \text{ [mV]}$	$U_{výst} \text{ [\%]}$
200	0,276
300	0,29
500	0,165
700	0,133
1000	0,148
1500	0,077
2000	0,14
2500	0,194
3000	0,058

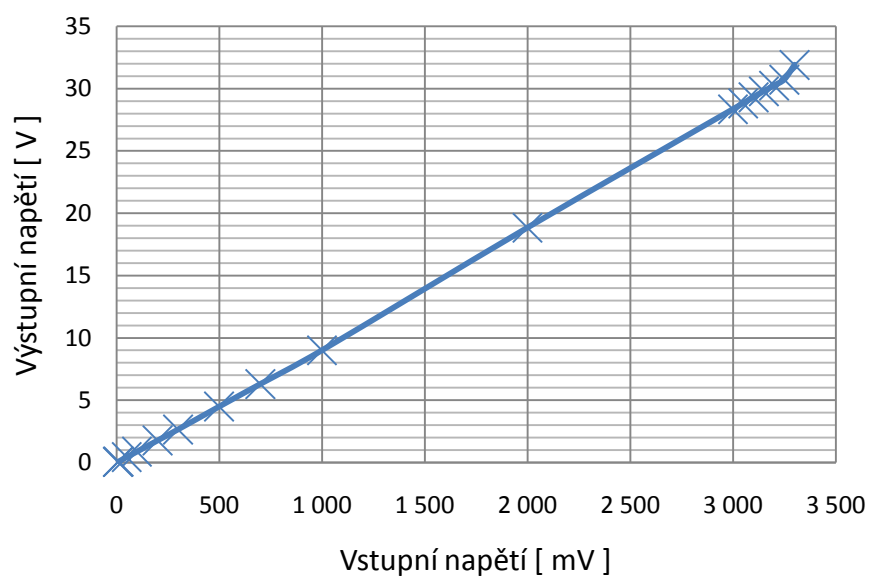
Závislost zkreslení na vstupním napětí



Měření dynamické charakteristiky

$U_{\text{vst}} [\text{mV}]$	$U_{\text{výst}} [\text{V}]$
7,1	0,06
10	0,08
50	0,44
100	0,89
200	1,78
300	2,66
500	4,50
700	6,30
1000	9,01
2000	18,84
3000	28,34
3050	28,82
3100	29,31
3150	29,78
3200	30,24
3250	30,72
3300	31,90

Dynamická charakteristika



Zesílení koncového stupně:

$$A_{dB} = 20 \cdot \log \frac{28,34}{3} = 9,45 \text{ dB}$$

Měření THD + N celého zesilovače

Hlasitost [%]	THD + N [%]
25	0,821
50	0,137
75	0,278
100	0,310

Měřeno při $U_{vst} = 300 \text{ mV}$, THD+N generátoru 0,025 %, $f_{vst} = 1 \text{ kHz}$, $R_z = 4 \Omega$,
potenciometry ekvalizéru nastaveny na 50 %.

Měření přeslechů

Pravý kanál $U_{vst} = 500 \text{ mV}$

Levý kanál $U_{výst} = 51 \text{ mV}$ (Levý kanál na vstupu uzemněn).

Odstup kanálů:

$$L_{dB} = 20 \cdot \log \frac{51}{500} = -19,83 \text{ dB}$$

Zesílení zesilovače

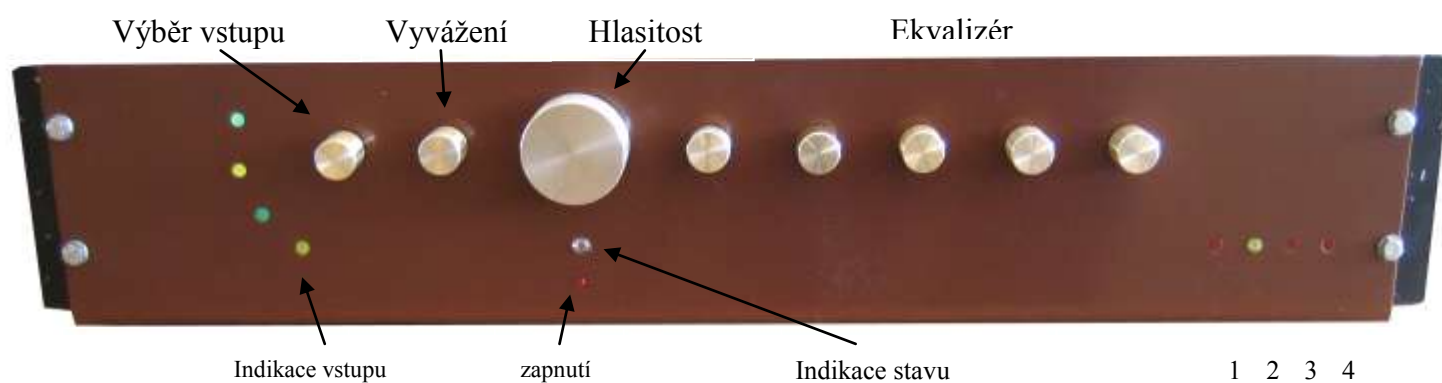
$U_{vst} = 550 \text{ mV}$

$U_{výst} = 30 \text{ V}$

$$A_{c-dB} = 20 \cdot \log \frac{30}{0,55} = 34,74 \text{ dB}$$

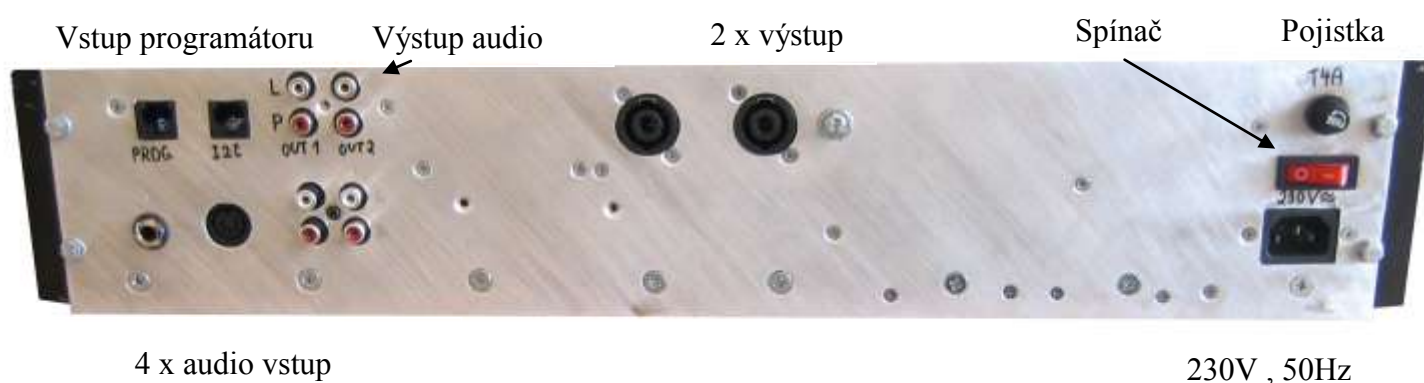
5.4 Fotodokumentace

Přední panel zesilovače



- 1.....limitace levého kanálu
- 2.....dotykový spínač tmy
- 3..... stejnosměrné napětí na výstupu, porucha
- 4..... limitace levého kanálu

Zadní panel



Rozložení modulů zesilovače

